

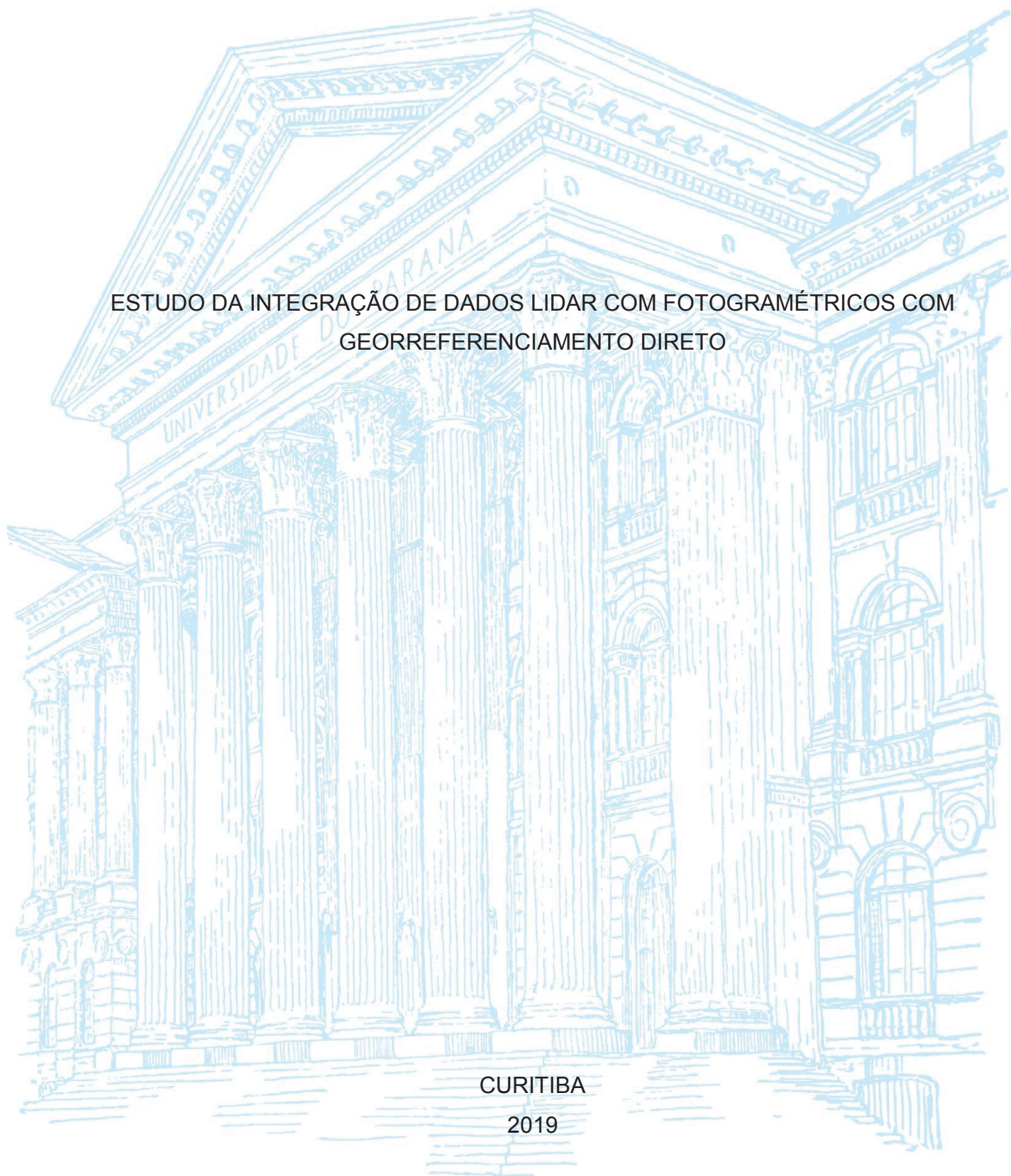
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE ANDRÉ LIMA COSTA

ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE DADOS LIDAR COM FOTOGRAMÉTRICOS COM
GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

CURITIBA

2019



FELIPE ANDRÉ LIMA COSTA

ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE DADOS LIDAR COM FOTOGRAMÉTRICOS COM
GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

CURITIBA

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C837e

Felipe André Lima Costa

Estudo da integração de dados LIDAR com fotogramétricos com georreferenciamento direto [Recurso eletrônico] / Felipe André Lima Costa – Curitiba, 2019.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra.
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Orientador: Edson Aparecido Mitishita

1. Georreferenciamento. 2. Fotogrametria. 3. Calibração de câmera *in situ*. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mitishita, Edson Aparecido. III. Título.

CDD: 526.982

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6


TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **FELIPE ANDRE LIMA COSTA** intitulada: **ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE DADOS LIDAR COM FOTOGRAFIA MÉTRICOS COM GEORREFERENCIAMENTO DIRETO**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Fevereiro de 2019.


EDSON APARECIDO MIYASHITA
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


ALUIR PORFÍRIO DAL POZ
Avaliador Externo (UNESP/PP)


LEONARDO ERICKSON FILHO
Avaliador Externo (UFPR)


ALVARO MURIEL LIMA MACHADO
Avaliador Interno (UFPR)

Dedico esta Tese aos meus pais Helder e Marta, meu irmão Neto e minha esposa Cléo por estarem sempre do meu lado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria que vem me dando.

Aos meus pais, pela insistência na educação dos filhos e pelos valores que transcendem o mundo existencialista em que vivemos.

Ao meu orientador Professor Dr. Edson Aparecido Mitishita pela orientação, amizade e pelo voto de confiança a mim dados.

Aos amigos que conviveram comigo na PI-07B, Niarkios, Marlo e Biffi, pelos momentos alegres e outros não tanto.

A todos integrantes do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR.

Ao Instituto LACTEC e à empresa TOPOCART por terem cedido os dados utilizados na pesquisa.

À Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) pela oportunidade concedida.

A todos, que por descuido, esqueci de mencionar.

Combati o bom combate, completei a corrida, guardei a Fé.

(Paulo de Tarso)

RESUMO

Nos dias atuais, a grande maioria dos levantamentos aerofotogramétricos é realizada com a tecnologia de georreferenciamento direto de imagens e simultâneo com o levantamento LIDAR, visando a extração 3D de geoinformações. Para a utilização dessa integração, exige-se que os dados de imagem e LIDAR estejam num mesmo referencial de mapeamento. O georreferenciamento direto de sensores (DSG) é uma das estratégias para registrar os dados fotogramétricos e LIDAR em um mesmo sistema de referência. Este procedimento é baseado nas informações de posição e orientação oriundas dos sensores GNSS/INS. Devido a imprecisão dos parâmetros de montagem dos sistemas sensores, a posição e orientação são mal determinadas. Diferentemente do afastamento linear entre a câmera e IMU (*lever arms*), que é determinado com métodos topográficos, o desalinhamento angular (*boresight misalignment angles*) não é fisicamente determinado. Neste cenário, a exatidão da determinação do desalinhamento angular é crítica para a obtenção de modelos fotogramétricos livres de paralaxes verticais “y”. Assim, este trabalho propõe uma metodologia de calibração do desalinhamento angular entre a IMU/Câmera para melhoria do georreferenciamento direto, usando a complementaridade dos dados fotogramétricos e LIDAR. Para este fim, um sub-bloco localizado no centro do bloco fotogramétrico foi selecionado para ser utilizado na calibração *in situ* dos POI da câmera, juntamente com pontos de controle LIDAR (LCPs). Na sequência, a calibração do desalinhamento angular foi realizada usando pontos de controle LIDAR virtuais (VLCPs) através das equações de colinearidade na forma indireta e direta. A verificação da qualidade dos resultados obtidos se deu nos espaços imagem e objeto, usando pontos verificação LCPs ao longo de todo bloco em modelos fotogramétricos. Em geral, os resultados obtidos mostraram uma melhoria dos erros quadráticos médio nos pontos de verificação calculados pelo georreferenciamento direto nos espaços imagem e objeto. Além disso, a metodologia proposta apresentou resultados similares com a metodologia a dois passos.

Palavras-chave: Calibração de câmera *in situ*. Georreferenciamento direto. Pontos de controle LIDAR. Calibração do desalinhamento angular.

ABSTRACT

Nowadays, most of the photogrammetric mapping projects is conducted with imagery direct georeferencing technology, simultaneously with LIDAR survey for 3D geoinformation extraction. The integration of imagery and LIDAR requires the both datasets in the same reference system. The direct sensor georeferencing (DSG) is an approach to register photogrammetric and lidar datasets in a common mapping reference system. This procedure is based on the information (position and orientation) derived from GNSS/INS data. Due to inaccurate system mounting parameters, the attitudes and positions are badly calculated. Unlike the lever arm offset, which is determined by topographic survey, the boresight misalignment angles are not physically measured. In this scenario, the accuracy of the boresight misalignment angles (physical mounting angles between digital camera and IMU) is critical to obtain models free of y-parallaxes. Therefore, this research aims to develop the boresight misalignment angles calibration approach to improve direct sensor georeferencing, using the complementarity of the photogrammetric and lidar datasets. For this purpose, one sub-block was extracted at the center of the entire block. Then, the *in situ* camera calibration was performed using this sub-block and sets of lidar control points (LCPs). Sequentially, a boresight calibration was performed by the inverse and direct collinearity equations, using virtual lidar control points (VLCPs). The quality assessment of the approach was measured in both image and object spaces, using two-ray check points at the entire block. The overall results from the performed experiments showed significant improvements of the RMSE of the check points discrepancies computed by direct georeferencing. In addition, the proposed approach achieved similar results with the two-step methodology.

Keywords: *In situ* Camera Calibration. Direct Georeferencing. Lidar Control Points. Boresight Angles Calibration.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPONENTES DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO LIDAR	23
FIGURA 2 - SISTEMAS DE COORDENADAS E PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO GEOREFERENCIAMENTO DIRETO DE UM SISTEMA LIDAR	25
FIGURA 3 - FEIÇÕES PONTUAIS EXTRAÍDAS DOS CANTOS DE PRÉDIOS.....	27
FIGURA 4 – CONTORNOS LINEARES DE OBJETOS USADOS NO REGISTRO IMAGEM E LIDAR.....	27
FIGURA 5 - REGISTRO BASEADO EM FEIÇÕES PLANARES.....	28
FIGURA 6 - PRIMITIVAS GEOMÉTRICAS DO MÉTODO BASEADO EM SUPERFÍCIES	29
FIGURA 7 - PICOS DE CORRESPONDÊNCIA ENTRE A IMAGEM <i>WOLRDVIEW2</i> E LIDAR	30
FIGURA 8 - SISTEMAS DE COORDENADAS E PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA DETERMINAÇÃO DO PONTO FOTOGRAFÉTRICO USANDO A INTEGRAÇÃO GNSS/INS	34
FIGURA 9 - IMAGEAMENTO FOTOGRAFÉTRICO EM POUSO ALEGRE-MG	41
FIGURA 10 - SENSOR ULTRACAMX e IMAGEM SINTÓPICA GERADA.....	42
FIGURA 11 - COMPONENTES DO ALS60.....	43
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA	44
FIGURA 13 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO, DOS CINCO SUB-BLOCOS E DISTRIBUIÇÃO DOS LCPS DE CURITIBA-PR.....	45
FIGURA 14 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO, SUB-BLOCO E PONTOS LCPS DE POUSO ALEGRE-MG.....	46
FIGURA 15 - RESULTADOS OBTIDOS NA CLASSIFICAÇÃO USANDO A ROTINA <i>LASGROUND</i>	48
FIGURA 16 - TRIANGULAÇÃO IRREGULAR (TIN) DOS TELHADOS	48
FIGURA 17 - PONTOS DA NUVEM LIDAR DE UMA ÁREA RESIDENCIAL CLASSIFICADOS COMO TELHADOS	49
FIGURA 18 - VISUALIZAÇÃO 3D DOS TRIÂNGULOS DE DELAUNAY CLASSIFICADOS	50
FIGURA 19 - ILUSTRAÇÃO DO PLANO AJUSTADO PARA OS PONTOS DA NUVEM LIDAR.....	51

FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS DE LIGAÇÃO NO SUB-BLOCO.....	54
FIGURA 21 – DIVISÃO DA NUVEM DE PONTOS EM CÉLULAS.....	56
FIGURA 22 – PROJEÇÃO DO PONTO VLCP NO MDT LIDAR	58
FIGURA 23 – DISTRIBUIÇÃO DOS LCPs EXTRAÍDOS	65
FIGURA 24 – RESULTADOS DAS INTERSEÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS MÚLTIPLOS RAIOS.....	69
FIGURA 25 – REQM DAS PARALAXES Y NOS 41 LCPs COM POI <i>IN SITU</i>	75
FIGURA 26 – REQM DAS PARALAXES Y NOS 41 LCPs COM POI <i>IN SITU</i> E SEM VALOR ÚNICO DE <i>BORESIGHT ANGLES</i>	77
FIGURA 27 – REQM DAS PARALAXES Y NOS 41 LCPs COM POI <i>IN SITU</i> E SEM VALORES DE <i>BORESIGHT ANGLES</i> PARA CADA SENTIDO DE VOO	80
FIGURA 28 - REQM DAS PARALAXES Y NOS 41 LCPs COM POI DE FÁBRICA..	83

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – REQM DAS DISCREPÂNCIAS DOS 41 LCPs DE VERIFICAÇÃO EM DIFERENTES EXPERIMENTOS COM POI <i>IN SITU</i>	89
GRÁFICO 2 - REQM DAS DISCREPÂNCIAS DOS 41 LCPs DE VERIFICAÇÃO EM DIFERENTES EXPERIMENTOS COM POI DE FÁBRICA	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS DADOS FOTOGRAMÉRICOS E LIDAR	22
TABELA 2 - RESULTADOS DOS RESÍDUOS DA CALIBRAÇÃO <i>IN SITU</i>	66
TABELA 3 - POI ESTIMADOS PELA CALIBRAÇÃO <i>IN SITU</i> DA CÂMERA	67
TABELA 4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO MÉDIA ENTRE POI E POE.....	67
TABELA 5 - VALORES DOS ELEMENTOS USADOS PARA CÁLCULO DE (C, L) .	70
TABELA 6 - RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO USANDO UM ÚNICO VALOR DE DESEALINHAMENTO ANGULAR PARA TODO SUB- BLOCO	71
TABELA 7 - RESULTADOS DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO PROPOSTO USANDO VALORES PARA CADA SENTIDO DE VOO PARA O SUB-BLOCO	72
TABELA 8 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO A DOIS PASSOS DOS <i>BORESIGHT ANGLES</i> USANDO ÚNICO VALOR PARA O SUB-BLOCO	72
TABELA 9 - RESULTADOS DO MÉTODO A DOIS PASSOS DE CALIBRAÇÃO USANDO VALORES PARA CADA SENTIDO DE VOO DO SUB- BLOCO	73
TABELA 10 - RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO USANDO VALORES PARA CADA SENTIDO DE VOO DO SUB-BLOCO COM POI DE FÁBRICA.....	73
TABELA 11 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE SHAPIRO-WILK PARA DG	75
TABELA 12 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO <i>t</i> DE <i>STUDENT</i> PARA DG	76
TABELA 13 – RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE <i>SHAPIRO-WILK</i> PARA DG_PCBA	77
TABELA 14 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO <i>t</i> DE <i>STUDENT</i> PARA DG_PCBA.....	78
TABELA 15 – RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE SHAPIRO-WILK PARA DG_RCBA.....	78
TABELA 16 - RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO <i>t</i> DE <i>STUDENT</i> PARA DG_RCBA.....	79

TABELA 17 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE <i>SHAPIRO-WILK</i> PARA DG_PBAES	80
TABELA 18 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO <i>t</i> DE <i>STUDENT</i> PARA DG_PBAES	81
TABELA 19 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE <i>SHAPIRO-WILK</i> PARA DG_RBAES	81
TABELA 20 - RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO <i>t</i> DE <i>STUDENT</i> PARA DG_RBAES	82
TABELA 21 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE <i>SHAPIRO-WILK</i> PARA DG	84
TABELA 22 - RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO <i>t</i> DE <i>STUDENT</i> PARA DG	84
TABELA 23 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE <i>SHAPIRO-WILK</i> PARA DG_PBAES	84
TABELA 24 - RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO <i>t</i> DE <i>STUDENT</i> PARA DG_PBAES	85
TABELA 25 - REQM DAS PARALAXES Y RESIDUAIS NOS 41 LCPs EM DIFERENTES EXPERIMENTOS	86
TABELA 26 - RESULTADOS DAS DISCREPÂNCIAS DOS 41 LCPs DE VERIFICAÇÃO NO ESPAÇO OBJETO	88

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ALS	- Airborne Laser Scanning
BBA	- Bundle Block Adjustment
CCD	- Charged-Coupled Device
CP	- Centro Perspectivo
DG	- Direct Georeferencing
DG_PBAES	- DG without Proposed Boresight Angles for Each Strip
DG_PCBA	- DG without Proposed Constant Boresight Angles
DG_RBAES	- DG without Robust Boresight Angles for Each Strip (Two-step)
DG_RCBA	- DG without Robust Constant Boresight Angles (Two-step)
GNSS	- Global Navigation Satellite System
IMU	- Inertial Measurement Unit
ISO	- Integrated Sensor Orientation
LASER	- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LCPs	- LiDAR Control Points
LiDAR	- Light Detection and Ranging
MDT	- Modelo Digital de Terreno
MMQ	- Método dos Mínimos Quadrados
POE	- Parâmetros de Orientação Exterior
POI	- Parâmetros de Orientação Interior
REQM	- Raiz do Erro Quadrático Médio
RTX	- Real Time Extended
SARP	- Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotados
SFM	- Structure from Motion
SIFT	- Scale Invariant Feature Transform
VLCP	- Virtual Lidar Control Point

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	Objetivo Geral.....	19
1.3.2	Objetivos Específicos	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	INTEGRAÇÃO DE DADOS LIDAR E FOTOGRAMÉTRICOS.....	21
2.1.1	Sistema de Escaneamento LASER Aéreo.....	22
2.1.2	Registro entre Dados Fotogramétricos e LIDAR	26
2.1.2.1	Registro Baseado em Feições.....	26
2.1.2.2	Registro Baseado em Superfícies	28
2.1.2.3	Registro Baseado em Imagem de Intensidade.....	29
2.2	CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE CÂMERAS.....	30
2.3	A INTEGRAÇÃO DO GNSS/INS PARA SISTEMAS DE CÂMERAS.....	33
2.3.1	Georreferenciamento Direto de Sensores	35
2.3.2	Orientação Integrada de Sensores	37
2.3.3	Calibração do Desalinhamento Angular IMU/Câmera	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	40
3.2	LEVANTAMENTOS FOTOGRAMÉTRICO E LIDAR.....	40
3.2.1	Sistema Fotogramétrico UltraCam Xp	41
3.2.2	Sistema LASER <i>Scanner</i> ALS60.....	42
3.3	METODOLOGIA.....	43
3.3.1	Seleção do Bloco/Sub-Bloco de Estudo	44
3.3.2	Extração de Pontos de Controle LIDAR	47
3.3.2.1	Filtragem dos Pontos LIDAR Localizados em Telhados.....	47
3.3.2.2	Extração dos Planos das Águas dos Telhados	49
3.3.2.3	Modelagem dos Planos das Águas	50
3.3.2.4	Interseção dos Planos das Águas (Determinação do LCP).....	52
3.3.3	Calibração <i>in Situ</i> de Câmera Utilizando Sub-bloco	53

3.3.4	Determinação das Coordenadas 3D pela Equação de Colinearidade Inversa.....	55
3.3.5	Determinação do Desalinhamento Angular pela Metodologia Proposta.....	58
3.3.6	Determinação do Desalinhamento Angular pelo Método a Dois Passos.....	60
3.3.7	Avaliação dos Desalinhamentos Angulares Determinados nos Espaços Imagem e Objeto.....	61
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	64
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	64
4.2	EXTRAÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE LIDAR (LCPS).....	64
4.3	CALIBRAÇÃO <i>IN SITU</i> DE CÂMERA UTILIZANDO SUB-BLOCO	66
4.4	DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS 3D PELA EQUAÇÃO DE COLINEARIDADE INVERSA	68
4.5	DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ANGULAR PELA METODOLOGIA PROPOSTA E DE REFERÊNCIA	70
4.5.1	DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ANGULAR PELA METODOLOGIA PROPOSTA.....	70
4.5.2	DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ANGULAR PELO MÉTODO A DOIS PASSOS.....	72
4.5.3	DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ANGULAR PELA METODOLOGIA PROPOSTA COM POI DE FÁBRICA.....	73
4.6	AVALIAÇÃO DOS DESALINHAMENTOS ANGULARES DETERMINADOS NOS ESPAÇOS IMAGEM E OBJETO	74
4.6.1	EXPERIMENTO COM POI <i>IN SITU</i> E COM <i>BORESIGHT ANGLES</i> PARA TODO O BLOCO.....	74
4.6.2	EXPERIMENTOS COM POI <i>IN SITU</i> E SEM <i>BORESIGHT ANGLES</i> PARA TODO O BLOCO.....	76
4.6.3	EXPERIMENTOS COM POI <i>IN SITU</i> E SEM <i>BORESIGHT ANGLES</i> PARA CADA SENTIDO DE VOO.....	79
4.6.4	EXPERIMENTOS COM POI DE FÁBRICA E VALORES DE <i>BORESIGHT ANGLES</i> PARA CADA SENTIDO DE VOO	82
4.6.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS	85
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	91
	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A integração de dados LIDAR com fotogramétricos tem aumentado o grau de automação da extração de geoinformações em mapeamentos fotogramétricos. Devido a relevância do tema, em 2011, o *European Spatial Data Research* (EuroSDR) lançou um projeto intitulado *Registration Quality - Towards Integration of Laser Scanning and Photogrammetry* (RÖNNHOLM, 2011), objetivando a análise dos métodos desenvolvidos e em desenvolvimento para a integração de dados fotogramétricos e ALS. Os estudos conduzidos pelas nove instituições participantes do projeto consideraram avaliações da influência do nível de automação dos processos de integração, bem como o tempo de processamento requerido.

Os processos autônomos desenvolvidos para a integração de dados LIDAR com imagens para aplicações na Fotogrametria, apesar de consolidados, ainda não estão totalmente finalizados. De acordo com Rönnholm (2011), espera-se nos próximos anos que a integração de tais tecnologias seja um procedimento comum para reconhecimento automático de objetos, classificação de vegetações e uso do solo e modelagem 3D.

Atualmente, a grande maioria dos levantamentos aerofotogramétricos é realizada com a tecnologia de georreferenciamento direto de imagens e simultâneo com o levantamento LIDAR, visando a extração de geoinformações. Para a utilização dessa integração, exige-se que os dados de imagem e LIDAR estejam num mesmo referencial de mapeamento.

Tradicionalmente, as metodologias para a integração de ambos os dados recaem nos georreferenciamentos indireto e direto. Vários estudos empregaram metodologias baseadas no georreferenciamento indireto. Contudo, para essas metodologias, a definição de pontos de apoio exige a implementação de métodos de extração direta de primitivas geométricas na nuvem LIDAR, tais como pontos, linhas e áreas, pois esses dados não mostram diretamente tais primitivas.

Em Delara, Mitishita e Habib (2004), os autores desenvolveram um procedimento para extração de pontos de controle LIDAR (LCPs) com o uso das imagens de intensidade. A partir dos LCPs, foi realizada a aerotriangulação de imagens de uma câmera de baixo custo. Habib, Ghanma e Mitishita (2004) e Habib,

Ghanma e Kim (2005) implementaram metodologias de registro entre dados LIDAR e fotogramétrico com feições lineares utilizando a transformação de similaridade 3D. Kim, Ghanma e Habib (2006) desenvolveram uma metodologia para geração de ortofotos verdadeiras a partir da integração de imagens e dados LIDAR. Mitishita et al. (2008) propuseram um método para extração dos centroides dos telhados das edificações na nuvem LIDAR, que foram utilizados como pontos de controle para aerotriangulação. Em Wildan, Aldino e Aji (2011), foram utilizados LCPs para realizar a aerotriangulação de um grande bloco fotogramétrico com fotografias aéreas analógicas. Segundo os autores, o mapeamento atendeu ao padrão de exatidão cartográfica na escala de 1:50.000 daquele país.

O georreferenciamento direto é outra estratégia utilizada para integração de dados fotogramétricos com LIDAR em levantamentos simultâneos ou não. Em voos simultâneos, ambos os dados são adquiridos automaticamente no mesmo referencial de mapeamento pelos sistemas GNSS/INS. Contudo, levantamentos não simultâneos são mais realizados devido flexibilidade dos requisitos de voo e tempo. Assim, a posição e orientação dos dados fotogramétricos e LIDAR são fornecidos separadamente no mesmo referencial de mapeamento.

Em ambos os cenários do georreferenciamento direto, a exatidão da integração dos dados fotogramétricos e LIDAR são dependentes da qualidade dos parâmetros que modelam os sistemas sensores. Gneeniss (2013) e Gneeniss, Mills e Miller (2015) realizaram estudos no sentido de avaliar a quantidade e distribuição dos pontos de controle LIDAR que possibilitem uma aerotriangulação de qualidade para grandes blocos fotogramétricos. No mesmo estudo foi conduzido a calibração *in situ* dos POI utilizando LCPs. Yang et al. (2016) desenvolveram um método de registro de imagens com dados LIDAR baseado no ajustamento combinado, utilizando a altimetria LIDAR como injeção de posição. Scott et al. (2016) enfatizaram a importância de uma boa calibração dos sistemas LIDAR-câmera para um bom registro dos dados. Dhall et al. (2017) propuseram um método de registro 3D entre dados LIDAR e imagens com menos números de pontos correspondentes.

Embora ambos os sistemas sensores, frequentemente, compartilhem uma mesma IMU integrada com sensor GNSS, os dados de imagem e de LIDAR não se integram exatamente, devido a problemas de registro no mesmo referencial de mapeamento. Usualmente, a calibração do sistema fotogramétrico é realizada independente do sistema LIDAR. Além disso, o georreferenciamento direto de

imagens depende de condições físicas locais, por exemplo, a variabilidade de temperatura e pressão atmosférica, que podem modificar a posição e orientação relativa da câmera em relação a IMU e/ou afastamento da condição de colinearidade do raio de luz ocasionado pela mudança da refração atmosférica. Desta forma, a calibração do sistema fotogramétrico em serviço, integrada com dados LIDAR assume papel de fundamental importância no georreferenciamento direto de imagens para aplicações de mapeamento fotogramétrico integrado com dados LIDAR.

Considerando-se que o afastamento linear da câmera e IMU seja um conjunto de parâmetros (dX , dY , dZ), precisamente ou mais facilmente, determinado com métodos topográficos, a calibração do sistema fotogramétrico tem sido, geralmente, direcionada com a determinação da orientação relativa entre IMU/Câmera ($d\omega$, $d\phi$, $d\kappa$) e dos parâmetros que recuperam a geometria interna da câmera (POI). Assim, esta pesquisa leva em conta essa condição. Além disso, considera que a calibração dos POI *in situ* de um sub-bloco, seguida do refinamento da orientação relativa entre IMU/Câmera, integrada com dados LIDAR, poderá aumentar a exatidão da integração dos dados LIDAR no georreferenciamento direto de imagens. Neste sentido, apresenta-se uma proposta metodológica para a determinação desses ângulos utilizando-se a nuvem de pontos LIDAR no terreno, sem a utilização de pontos de controle GNSS em campos de calibração.

Os principais questionamentos a serem respondidos ao final desta pesquisa são: (i) os POI estimados na calibração de um sub-bloco são representativos para todo o bloco fotogramétrico no georreferenciamento direto; e (ii) o desalinhamento angular (*boresight misalignment angles*) calculado a partir de um sub-bloco pode ser aplicado em todo o bloco para a melhoria da exatidão posicional da integração dos dados LIDAR no georreferenciamento direto de imagens.

1.2 JUSTIFICATIVA

A qualidade dos parâmetros que modelam os sistemas sensores influenciam na exatidão da integração dos dados fotogramétricos e LIDAR. Greeniss, Mills e Miller (2015) propuseram uma metodologia para executar a autocalibração da câmera utilizando LCPs no ajustamento de bloco. A metodologia se mostrou eficiente e com boa relação custo-benefício, sendo uma alternativa para a calibração de câmeras *in situ*. Contudo, a pesquisa não considerou a determinação do desalinhamento angular

(*boresight misalignment angles*) entre o corpo da IMU e Câmera, que apresentam um papel importante na exatidão da determinação das coordenadas 3D no terreno.

Embora a determinação dos parâmetros de calibração de sistemas fotogramétricos seja bem desenvolvida (KRUCK, 2001; CRAMER e STALLMANN, 2001; MOSTAFA, 2001; SKALLOUD e SCHAER, 2003 e CRAMER, 2009, a calibração do desalinhamento angular entre IMU/Câmera ainda é objeto de preocupação na comunidade de usuários (ABDULAH, 2016), especialmente no georreferenciamento direto. Desta forma, o desenvolvimento de uma metodologia envolvendo a calibração do sistema fotogramétrico *in situ*, integrada com dados LIDAR, assume papel de fundamental importância no georreferenciamento direto de imagens para aplicações compatíveis às escalas do mapeamento sistemático.

Assim, a contribuição desta pesquisa está no desenvolvimento de uma metodologia para o melhoramento da exatidão posicional do georreferenciamento direto de imagens fotogramétricas a partir da integração de dados LIDAR com imagens, através do refinamento dos parâmetros de orientação relativa IMU/Câmera. Além disso, trata-se de uma metodologia alternativa para estimativa dos parâmetros de montagem a partir de um sub-bloco de imagens sem a utilização de pontos de controle no terreno.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver metodologia para aumentar a exatidão da integração de dados LIDAR com fotogramétricos no georreferenciamento direto de imagens, através do refinamento dos parâmetros de montagem dos sistemas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo geral da pesquisa, os objetivos específicos são os seguintes:

1. Selecionar um sub-bloco representativo do bloco fotogramétrico de estudo.

2. Realizar a filtragem de dados LIDAR para a obtenção do MDT da região que contenha o sub-bloco de estudo.
3. Realizar a filtragem de dados do MDS LIDAR para a obtenção dos planos dos telhados da região que contém o bloco de estudo.
4. Determinar pontos de apoio fotogramétrico com base na interseção de planos de telhados de edificações (LCPs).
5. Calibrar a câmera *in situ*, utilizando um sub-bloco, empregando os LCPs.
6. Determinar um valor único de desalinhamento angular ($d\omega$, $d\phi$, dk) a partir de um sub-bloco da área de estudo.
7. Determinar um valor único de ($d\omega$, $d\phi$, dk) para cada sentido de voo a partir de um sub-bloco da área de estudo.
8. Avaliar a exatidão da integração de dados fotogramétricos com LIDAR empregando os valores obtidos em 7 e 9 para todo bloco.
9. Avaliar a exatidão da integração dos dados fotogramétricos e LIDAR empregando os POI de fábrica e os obtidos pela calibração da câmera *in situ*.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo são apresentadas as considerações iniciais, justificativas e potenciais contribuições da Tese, bem como os objetivos gerais e específicos. No segundo capítulo é abordada a revisão da literatura contendo os aspectos teóricos da Tese. No capítulo 3 são descritos os materiais e as etapas da metodologia proposta. No capítulo 4 foram apresentados os resultados obtidos e discussões. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões obtidas na pesquisa e recomendações para trabalhos futuros abordando o tema.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica dos principais temas abordados na Tese. O item 2.1 trata da integração de dados LIDAR e fotogramétricos. O item 2.2 apresenta conceitos relacionados à calibração de sistemas de câmeras. Por fim, o item 2.3 descreve os aspectos que envolvem a integração do GNSS/INS para a Fotogrametria digital.

2.1 INTEGRAÇÃO DE DADOS LIDAR E FOTOGAMÉTRICOS

Segundo (SHAN e CHARLES K., 2018), a constante evolução tecnológica de mapeamento está disponibilizando as geoinformações oriundas de diferentes sensores por um custo acessível. A melhoria da qualidade dos dados obtidos pelos sistemas GNSS/INS tem impactado de forma positiva a aerotriangulação fotogramétrica, pois reduz os requisitos de controle. Além disso, permite uma melhor aquisição de feições tridimensionais utilizando a integração de dados LIDAR com imagens. Neste sentido, a complementaridade espectral e espacial de dados adquiridos por sistemas de imageamento e LIDAR é uma das motivações para uma melhor descrição do espaço objeto. O sinergismo de ambos os dados pode ser visualizado na TABELA 1. Como pode ser observado, as desvantagens de um sistema podem ser compensadas pelas vantagens do outro sistema.

TABELA 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS DADOS FOTOGRAMÉRICOS E LIDAR

Dados LIDAR x Fotogramétricos	
Vantagens LIDAR	Desvantagens da Fotogrametria
Alta informação posicional e superfícies homogêneas	Baixa informação posicional em superfícies homogêneas
Aquisição dia e noite	Aquisição somente de dia
Aquisição direta das coordenadas 3D	Aquisição das coordenadas 3D dependente de procedimentos de correspondência
A precisão altimétrica é melhor que a planimétrica	A precisão altimétrica é pior que a planimétrica
Dados Fotogramétricos x LIDAR	
Vantagens da Fotogrametria	Desvantagens LIDAR
Alta redundância na aquisição	Sem redundância inerente na aquisição
Rico em informação semântica	Dificuldade de obtenção de informação semântica
Densa informação posicional ao longo de linhas de quebra	Pouca informação posicional ao longo de linhas de quebra
A precisão planimétrica é melhor que a altimétrica	A precisão planimétrica é pior que a altimétrica

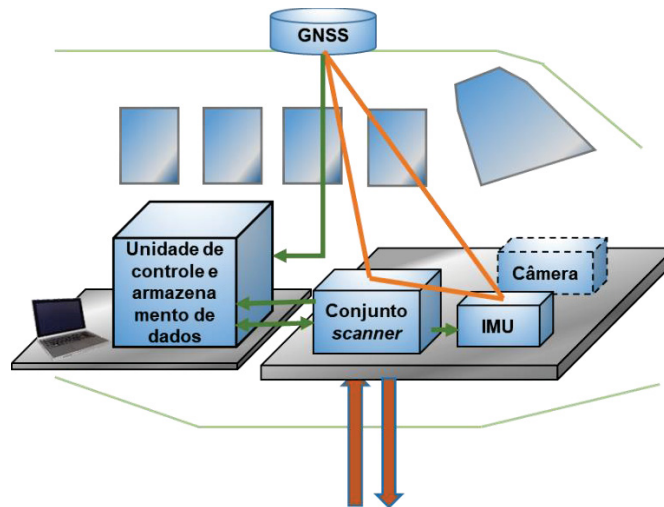
FONTE: Adaptado e traduzido de SHAN e CHARLES K. (2018). (SHAN e CHARLES K., 2018)

Para uma melhor compreensão da integração de dados LIDAR e fotogramétricos, faz-se necessário o conhecimento dos princípios de aquisição fotogramétrico e LIDAR. Assim, nas seções a seguir, serão descritos o sistema de imageamento de cada sensor. Na sequência, será apresentado o meio de integração dos dois sistemas através da seleção de primitivas que serão incorporadas no procedimento de aerotriangulação.

2.1.1 Sistema de Escaneamento LASER Aéreo

Segundo Vosselman e Maas (2010), o sistema de imageamento LIDAR é composto por dois principais componentes: um sistema de varredura *laser*, que mede a distância a um ponto no solo iluminado pelo *laser* e um GNSS/INS sistema que mede exatamente a posição e orientação do sistema. A FIGURA 1 ilustra os componentes básicos do sistema de escaneamento laser aéreo descrito pelos autores.

FIGURA 1 - COMPONENTES DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO LIDAR



FONTE: Adaptado e traduzido de Vosselman e Maas (2010).

1. **Conjunto scanner:** é composto pelo laser e sistema óptico/mecânico do scanner. O sistema laser montado em um orifício na fuselagem da aeronave, continuamente, envia pulsos de laser sobre o terreno durante o voo. Dependendo da velocidade e altura de voo, as tecnologias atuais permitem um escaneamento com densidade de pontos que varia de 0,2 a 50 pontos/m². Conjunto scanners modernos permitem uma compensação do ângulo de navegação *roll* para atenuar os efeitos de falta de sobreposição lateral entre as linhas de voo, evitando gastos de recursos desnecessários.
2. **Antena receptora GNSS:** é, normalmente, uma antena de frequência dupla com registro de sinais a uma frequência de 2Hz. A antena é montada na parte externa do topo da aeronave para exposição à constelação de satélites GNSS.
3. **Unidade de medida inercial (IMU):** a IMU ou é fixada diretamente no *laser scanner* ou próximo dele em uma plataforma estável. Normalmente, a IMU armazena dados de aceleração e taxas de rotação a uma frequência de 200 Hz. Enquanto os dados de aceleração são utilizados como suporte para a interpolação da posição da plataforma oriunda da trajetória do GNSS, as taxas de rotação são usadas para determinar a orientação da plataforma. A combinação de

GNSS e IMU permite reconstruir a trajetória do voo com uma exatidão melhor que 10 cm.

4. **Unidade de controle e armazenamento de dados:** dispositivo responsável pela sincronização do tempo e controle de todo o sistema. Armazena informações de alcance e posição coletadas pelo scanner, IMU e GNSS. Laser scanners modernos, que geram até 300.000 pulsos por segundo, produzem cerca de 20 *Gbyte* de dados por hora. Por outro lado, os dados de GNSS e IMU atingem até 0,1 *Gbyte* por hora.

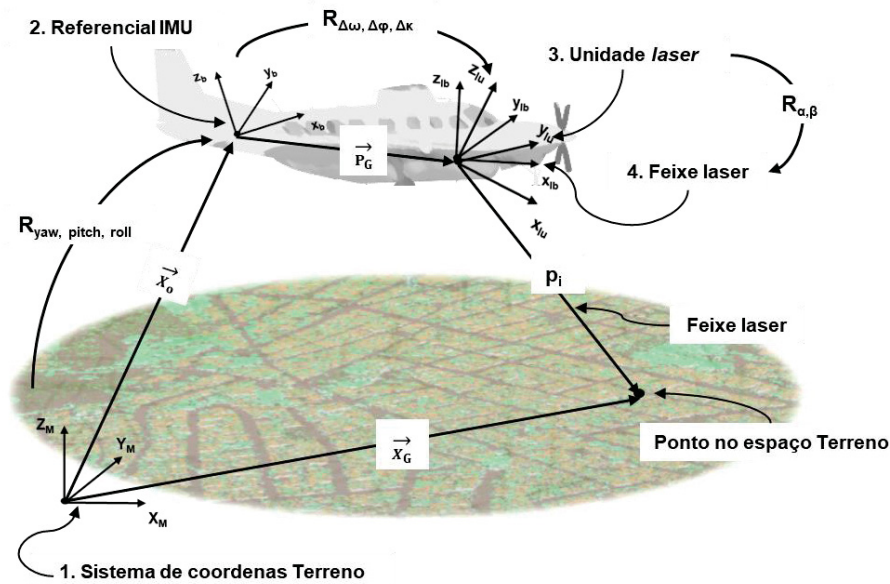
5. **Laptop do operador:** este é utilizado como meio de comunicação com a unidade de controle e armazenamento dos dados para configuração dos parâmetros da missão de voo e monitoramento do desempenho do sistema no voo.

6. **Sistema de gerenciamento do voo:** este é o meio pelo qual o piloto visualiza as linhas de voo pré-planejadas para a missão.

Segundo Shan e Charles K. (2018), a informação posicional derivada dos sistemas LIDAR é baseada no cálculo da distância da unidade laser ao objeto no terreno. Como mostrado na FIGURA 2, a medida da distância e do vetor feixe *laser* são acompanhadas da posição e orientação determinadas pelo conjunto GNSS/INS para determinação direta da posição do ponto no espaço objeto usando a equação (1).

$$\vec{X}_G = \vec{X}_o + R_{yaw,pitch,roll} \vec{P}_G + R_{yaw,pitch,roll} R_{\Delta\omega,\Delta\varphi,\Delta\kappa} R_{\alpha,\beta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{bmatrix} \quad (1)$$

FIGURA 2 - SISTEMAS DE COORDENADAS E PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO GEOREFERENCIAMENTO DIRETO DE UM SISTEMA LIDAR



FONTE: Adaptado e traduzido de Shan e Charles K. (2018).

onde:

\vec{X}_G : vetor posição do ponto laser no espaço no referencial Terreno;

\vec{X}_o : vetor posição da origem do referencial mapeamento à origem do corpo da IMU;

$R_{yaw, pitch, roll}$: matriz dos elementos da rotação do corpo da IMU no referencial Terreno;

\vec{P}_G : vetor posição da origem do corpo da IMU para a unidade laser no referencial da IMU, que é definido como afastamento posicional ou *lever arm offset*;

$R_{\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa}$: matriz dos elementos da rotação do corpo da unidade laser no referencial da IMU, que é definido como desalinhamento angular ou *boresight angles* ($\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa$);

$R_{\alpha, \beta}$: matriz dos elementos da rotação do feixe laser no referencial da unidade laser, que é definido pelo ângulo de escaneamento do espelho (α, β);

$[0, 0, -p]$: vetor da distância laser ao ponto com magnitude (p) no referencial do feixe laser (l_b).

Segundo Kersting (2011), a exatidão posicional dos pontos oriundos do sistema LIDAR depende dos erros randômicos e sistemáticos. Os erros randômicos estão relacionados as precisões das medidas dos sistemas GNSS/INS, ângulos dos

espelhos e distâncias do feixe laser. Por outro lado, os erros sistemáticos são ocasionados por tendências existentes nos parâmetros de montagem dos componentes, tendências nos sistemas de medição da distância e tendências nas posições e atitudes do GNSS/INS.

2.1.2 Registro entre Dados Fotogramétricos e LIDAR

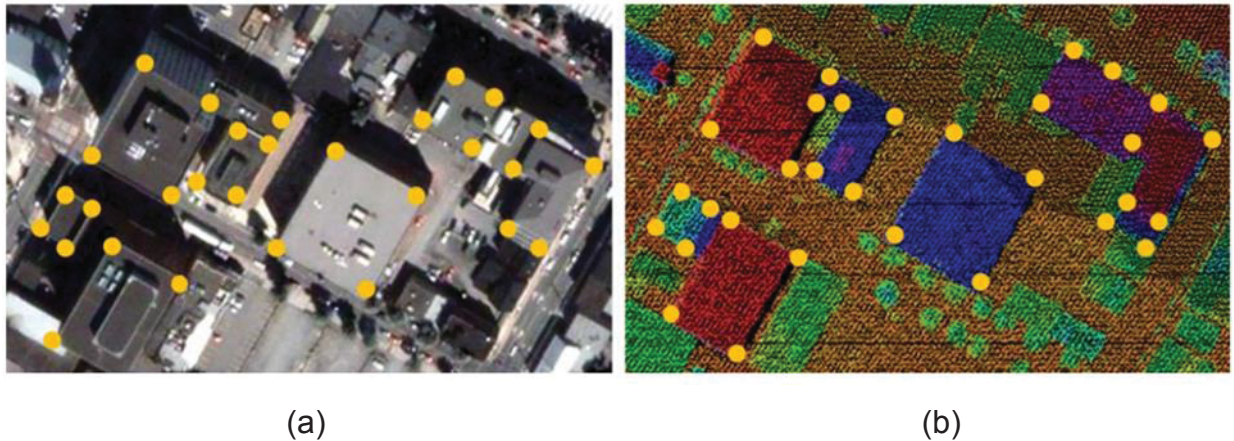
Como visto na TABELA 1, a complementaridade dos dois conjuntos de dados estimula combinação de ambos os dados visando a obtenção de uma informação tridimensional mais representativa da realidade física. Assim, faz-se necessário o uso de técnicas de registro com a definição de feições comuns entre os dados para que a extração 3D ocorra no mesmo referencial de mapeamento.

2.1.2.1 Registro Baseado em Feições

Normalmente, esses métodos utilizam feições que podem ser extraídas da nuvem de pontos LIDAR e que são comuns nas imagens. Essas feições podem ser pontos, retas e planos, cujos métodos de extração dependem da presença e da distribuição das feições correspondentes em ambos os dados.

As feições pontuais são as mais comuns para o registro de dados fotogramétricos e LIDAR. Devido à falta de semântica dos dados LIDAR, os pontos podem ser extraídos em regiões contendo cantos de edificações, cumeeiras de telhados, etc. Vários autores (YASTIKLI, TOTH e GREJNER-BRZEZINSKA, 2007; MISHRA e ZHANG, 2012 e WANG e FERRIE, 2015) utilizaram de tais primitivas para registro de nuvens LIDAR com imagens fotogramétricas. A FIGURA 3 apresenta os cantos de prédios utilizados como feições pontuais para registro de imagens e dados.

FIGURA 3 - FEIÇÕES PONTUAIS EXTRAÍDAS DOS CANTOS DE PRÉDIOS

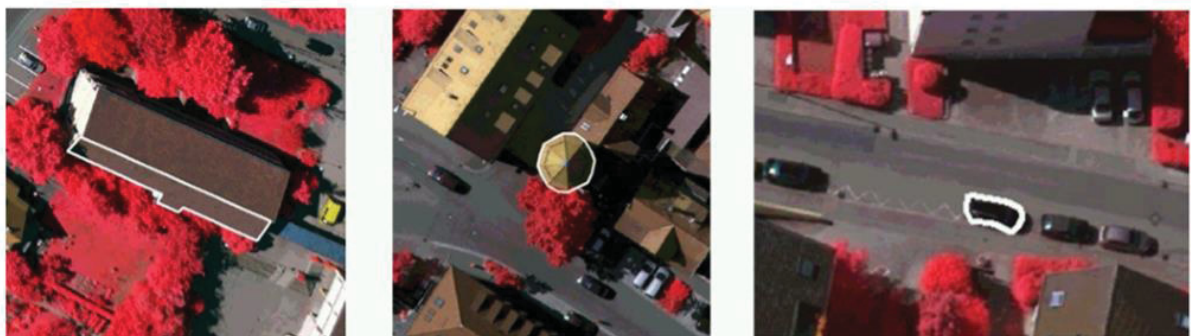


FONTE: Mishra e Zhang (2012).

LEGENDA: (a) IMAGEM AÉREA e (b) NUVEM LIDAR.

As feições lineares são identificadas facilmente em imagens aéreas, enquanto na nos dados LIDAR são obtidas manualmente pela observação do contorno de polígonos ou pela interseção de planos no processo de registro. Este método foi usado por (HABIB et al., 2004) para a obtenção dos parâmetros de similaridade 3D entre as imagens e dados LIDAR. Zhang et al. (2015) e Dal Poz (2018) utilizaram contornos de edificações para registro dos conjuntos de dados fotogramétricos e LIDAR. A FIGURA 4 ilustra alguns dos objetos com seus contornos utilizados no método.

FIGURA 4 – CONTORNOS LINEARES DE OBJETOS USADOS NO REGISTRO IMAGEM E LIDAR

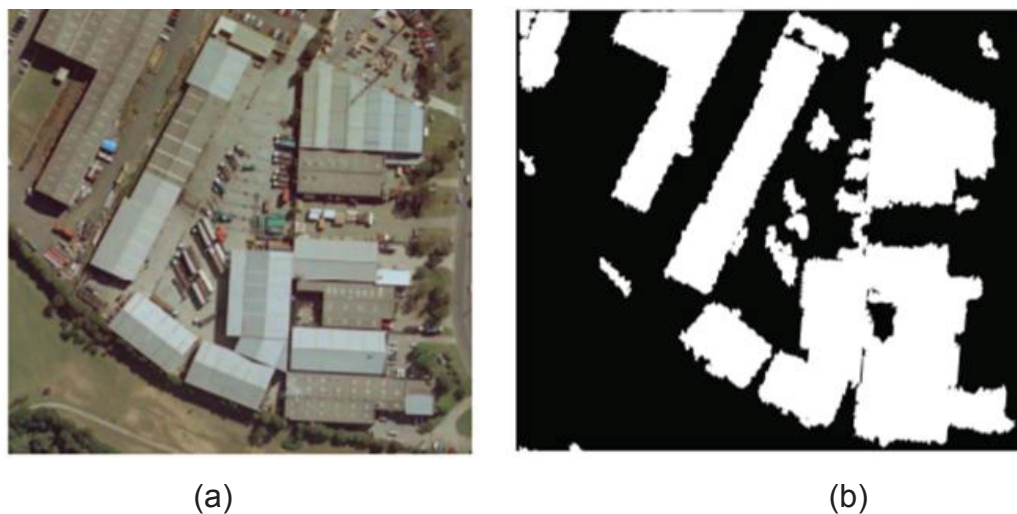


FONTE: Zhang et al. (2015).

O uso das feições planares para registro de dados é mais comum em áreas urbanas, onde os planos podem ser extraídos de modo semiautomático ou automático nos dois conjuntos de dados. Shorter e Kasparis (2008) desenvolveram um método baseado em planos, onde máscaras dos telhados de edificações extraídas na nuvem

LIDAR e imagens eram usadas para o registro como pode ser visto na FIGURA 5, onde a imagem de uma região edificada encontra-se na FIGURA 5(a) e sua respectiva máscara na FIGURA 5(b). Armenakis, Gao e Sohn (2013) propôs um método para registro dos dados com planos, que foram extraídos automaticamente usando um algoritmo de crescimento de regiões.

FIGURA 5 - REGISTRO BASEADO EM FEIÇÕES PLANARES



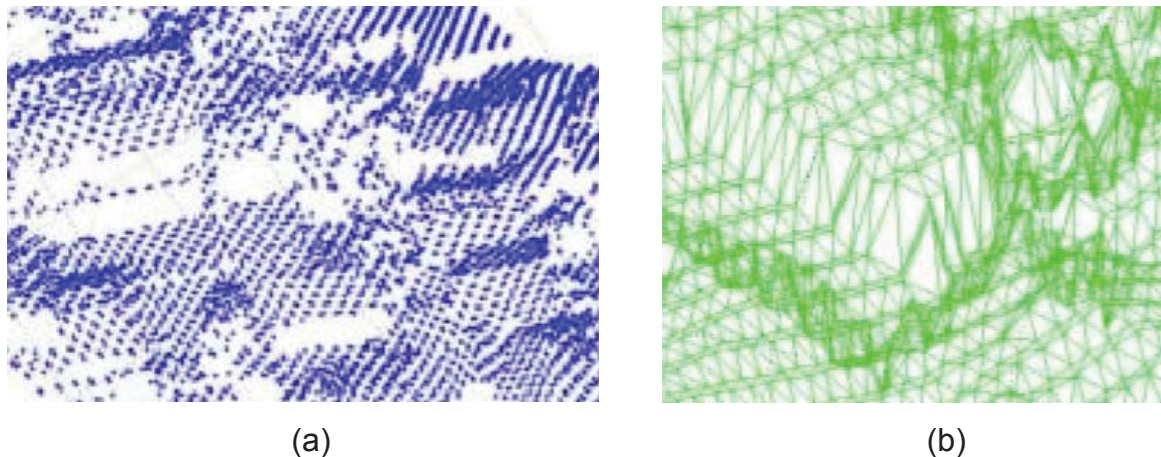
FONTE: Shorter e Kasparis (2008).

LEGENDA: (a) IMAGEM AÉREA e (b) MÁSCARA DA NUVEM LIDAR.

2.1.2.2 Registro Baseado em Superfícies

Uma outra forma de realizar o registro entre dados é através da correspondência das superfícies, onde as distâncias euclidianas entre as superfícies são minimizadas usando o MMQ (AKCA, 2007). Geralmente, essas técnicas requerem a interpolação das superfícies em grades regulares para a realização do procedimento. Contudo, a interpolação de superfícies pode induzir a erros, especialmente quando usada em grandes áreas urbanas. A FIGURA 6 ilustra as primitivas (pontos e triângulos irregulares) utilizadas em (HABIB et al., 2006) para o registro baseado em superfícies. Budge, Badamikar e Xie (2014) propôs um método para melhorar o registro de imagens e dados LIDAR visando a criação de mosaico de imagens 3D a partir de imagens fusionadas com LIDAR (*texel images*).

FIGURA 6 - PRIMITIVAS GEOMÉTRICAS DO MÉTODO BASEADO EM SUPERFÍCIES



FONTE: Habib et al. (2006).

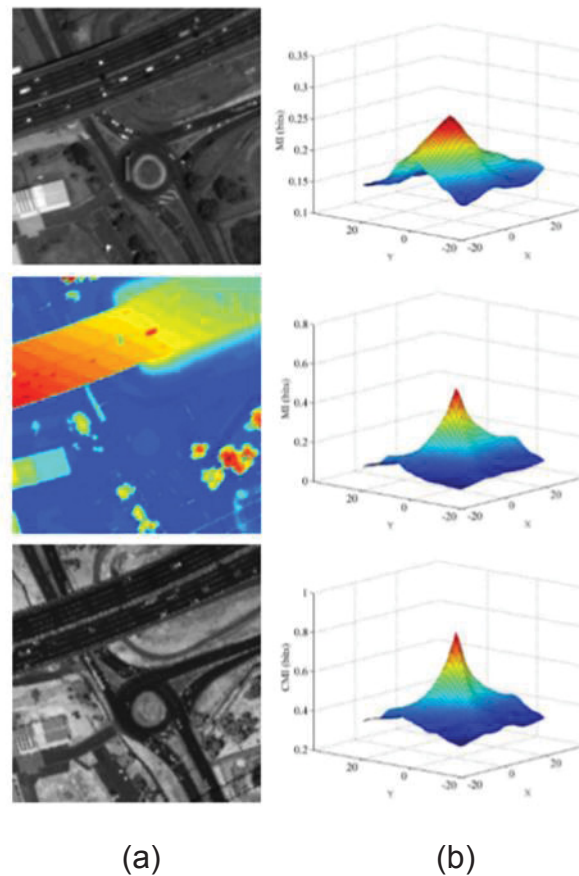
LEGENDA: (a) PONTOS e (b) REDE DE TRIANGULOS IRREGULARES.

2.1.2.3 Registro Baseado em Imagem de Intensidade

Diferentemente dos métodos supracitados, esta técnica busca métricas estatísticas entre os dados. Nesse método não se buscam feições comuns, mas similaridades no domínio da intensidade, por exemplo, valores de níveis de cinza entre imagens 2D LIDAR e fotogramétricas.

Outra técnica de similaridade para integração de imagens de intensidade LIDAR e fotogramétricas é a informação mútua (MI), que é definida pela função de densidade de probabilidade dos dados a serem registrados (PARMEHR et al., 2014). Wang e Ferrie (2015) utilizaram MI para registrar imagens panorâmicas e nuvem LIDAR móvel. A FIGURA 7 ilustra à esquerda a imagem do satélite *WorldView2*, o LIDAR MDS e a imagem de intensidade da mesma região. À direita são apresentados picos de similaridade das janelas correspondentes. Como pode ser observado, o pico em maior destaque é o da informação mútua entre as imagens de intensidade e do *WorldView2*.

FIGURA 7 - PICOS DE CORRESPONDÊNCIA ENTRE A IMAGEM WOLRDVIEW2 E LIDAR



FONTE: Parmehr et al. (2014).

LEGENDA: DE CIMA PARA BAIXO (a) IMAGEM DE SATÉLITE, LIDAR MDS e IMAGEM DE INTENSIDADE e (b) PICOS DE CONVERGÊNCIA DA CORRESPONDÊNCIA.

2.2 CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE CÂMERAS

O processo de calibração de câmeras é de suma importância para garantir a exatidão e confiabilidade dos trabalhos fotogramétricos, a partir do conhecimento do grupo de parâmetros necessários para à reconstrução do feixe perspectivo gerador da imagem no instante de sua tomada (ANDRADE, 2003). Tais grupos de parâmetros, conhecidos como parâmetros de orientação interior, possibilitam a produção de imagens digitais com a necessária informação espacial de alta qualidade para aplicações fotogramétricas.

A calibração de câmeras é um pré-requisito para qualquer imageamento fotogramétrico de alta exatidão posicional, e visa a determinação do modelo geométrico da câmera que descreve os parâmetros de orientação interior, tais como,

distância focal, coordenadas do ponto principal e distorções radial simétrica e tangencial (LUHMANN et al., 2006).

Como parte dos procedimentos fotogramétricos, a calibração de câmeras é tradicionalmente feita pelas empresas periodicamente para modelar e minimizar as distorções no espaço imagem. Diferentes técnicas de calibração têm sido empregadas na Fotogrametria conforme descritas em (CLARKE e FRYER, 1998; LUHMANN et al., 2006; KRAUS, 2007 e RONGFU, 2013) dentre elas destacam-se:

- **Calibração de laboratório:** é geralmente usada para câmeras métricas, os POI são determinados com o auxílio de goniômetros, colimadores ou outros instrumentos ópticos de alinhamento.
- **Calibração de campo:** utiliza um campo de calibração com pontos de controle sinalizados com coordenadas conhecidas. O campo é imageado com significativa sobreposição de imagens (60% longitudinal e 30% lateral), de forma a garantir múltiplos raios para uma boa interseção fotogramétrica nos pontos fotogramétricos contidos nas imagens. Esta calibração é processada através de ajustamento de bloco simultâneo com parâmetros adicionais para calcular os POI.
- **Calibração *plumb-line*:** o método emprega várias linhas retas em um campo de calibração. Seu princípio é que linhas retas devem imageadas como linhas retas e todos os desvios nas imagens são ocasionados pelas distorções.
- **Calibração *in situ*:** conhecida também como calibração em serviço, é realizada durante o projeto de voo, podendo utilizar um campo de calibração ou não. É processada através da técnica de ajustamento de bloco com autocalibração.
- **Autocalibração:** pode ser considerada como uma extensão da calibração campo e calibração *in situ*. Os coeficientes do modelo da autocalibração é conhecido como parâmetros adicionais da autocalibração. O método não requer pontos de controle conhecidos.

As vantagens e desvantagens de cada técnica, bem como seu uso em Fotogrametria de curta distância e em visão computacional são detalhados em (RONGFU, 2013).

FAIG e MONIWA (1973) propôs o modelo físico para a calibração de câmeras através das equações de colinearidade, conforme descritas de (2)-(6).

$$x - x_o = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Y - Y_o) + m_{13}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} + \Delta x, \quad (2)$$

$$y - y_o = -f \cdot \frac{m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{23}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} + \Delta y, \quad (3)$$

$$\Delta x = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(x - x_o) + P_1[r^2 + 2(x - x_o)^2] + 2P_2(x - x_o)(y - y_o) + b_1(x - x_o) + b_2(y - y_o), \quad (4)$$

$$\Delta y = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(y - y_o) + 2P_1(x - x_o)(y - y_o) + P_2[r^2 + 2(y - y_o)^2] + b_1(y - y_o), \quad (5)$$

com

$$r^2 = (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2, \quad (6)$$

onde:

- (x, y) : coordenadas do ponto no referencial do espaço imagem;
- (x_o, y_o) : coordenadas do ponto principal da câmera no referencial do espaço imagem;
- f : distância focal da câmera no referencial do espaço imagem;
- (X, Y, Z) : coordenadas do ponto no espaço objeto no referencial Terreno;
- (X_o, Y_o, Z_o) : coordenadas do centro de perspectiva da câmera no referencial Terreno;
- m_{ij} : elementos da matriz de rotação dos ângulos de orientação da câmera no referencial Terreno;
- (K_1, K_2, K_3) : são os parâmetros de distorção radial simétrica;
- (P_1, P_2) : são os parâmetros de distorção descentrada; e
- (b_1, b_2) : são os parâmetros de afinidade que modelam uma eventual variação de escala e não ortogonalidade do sensor sólido.

Contudo, o modelo matemático proposto apresenta altas correlações entre os parâmetros e pode não modelar de forma adequada as distorções em câmeras digitais multi-câmeras, conforme descrito por (HONKAVAARA et al., 2006 e CRAMER, 2009). Jacobsen (2007) apontou as correlações entre os parâmetros do modelo físico com as orientações exteriores e interiores. Assim, novos modelos de calibração de câmeras foram desenvolvidos para atender às novas câmeras com diversidade de

construção e características. Um maior detalhamento destes modelos pode ser encontrado em (RONGFU, 2013; BABAPOUR, MOKHTARZADE e ZOEJ, 2016 e SUN et al., 2016).

2.3 A INTEGRAÇÃO DO GNSS/INS PARA SISTEMAS DE CÂMERAS

Em mapeamentos fotogramétricos atuais, a integração GNSS/INS é de fundamental importância para obtenção de produtos com maior grau de automação, além de possibilitar a redução de custos, uma vez que limita o uso de pontos de controle (GCPs). Segundo Cramer e Tuttgart (1999), o GNSS fornece a determinação da posição e velocidade com uma alta exatidão, dependendo do método de processamento (absoluto, diferencial), do tipo de observação utilizada (pseudo-distância, *doppler* ou fase) e da geometria da constelação dos satélites. Por sua vez, o princípio da navegação inercial é baseado na mensuração das acelerações lineares e taxas de incrementos rotacionais do corpo da IMU em relação ao sistema de navegação.

Segundo Wegmann (2002), o pré-processamento dos dados GNSS/INS inclui a transformação dos sinais brutos GNSS e medidas da IMU em coordenadas tridimensionais do centro de perspectiva da câmera, para cada instante de tomada da imagem. A forma mais comum de integração entre os dados GNSS e IMU é através dos filtros de Kalman (KALMAN, 1960). O papel da IMU para os mapeamentos fotogramétricos depende de como a mesma será usada. Atualmente, existem dois cenários de seu uso: georreferenciamento direto e orientação integrada de sensor.

No georreferenciamento direto, as informações de posição e atitude da câmera, medidas diretamente com a integração GNSS/INS, são usadas diretamente no processo da interseção fotogramétrica, não havendo a necessidade de aerotriangulação. Nesse cenário, a exatidão do desalinhamento angular entre IMU-câmera é fundamental para obtenção de restituição fotogramétrica com mínima paralaxe. A equação (7) apresenta a posição do ponto da determinação direta, incorporando a posição e atitude do GNSS/INS.

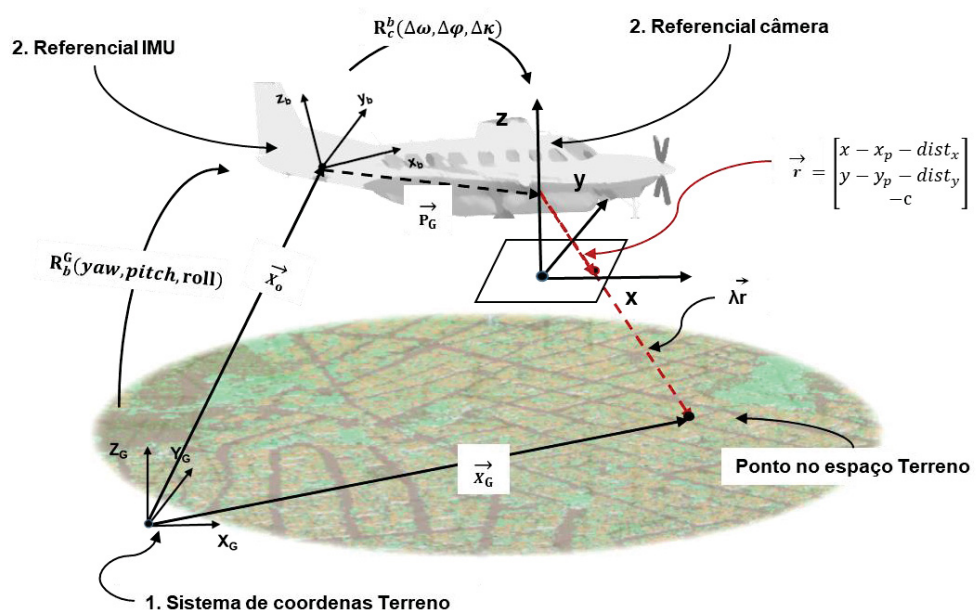
$$\vec{X}_G = \vec{X}_0 + R_b^G \cdot \vec{P}_G + \lambda \cdot R_b^G \cdot R_c^b \begin{bmatrix} x - x_p - dist_x \\ y - y_p - dist_y \\ -c \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde:

- \vec{X}_G : vetor posição do ponto no referencial de mapeamento;
- \vec{X}_o : vetor posição da origem do referencial de mapeamento à origem do corpo da IMU;
- R_b^G : matriz dos elementos da rotação do corpo da IMU no referencial de mapeamento;
- \vec{P}_G : vetor posição da origem do corpo da IMU para o CP da câmera, conhecido como desalinhamento linear (*lever arm offset*);
- R_c^b : matriz dos elementos da rotação entre o corpo da IMU e sistema de coordenadas da câmera, conhecido como desalinhamento angular (*boresight angles*);
- λ : fator de escala do ponto; e
- $(x_p, y_p, c, \text{dist}_x, \text{dist}_y)$: são, respectivamente, as coordenadas do ponto principal, distância focal e distorções das coordenadas (x, y) no espaço imagem.

A FIGURA 8 ilustra os sistemas de coordenadas e vetores envolvidos no uso da integração do GNSS/INS na Fotogrametria.

FIGURA 8 - SISTEMAS DE COORDENADAS E PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA DETERMINAÇÃO DO PONTO FOTOGRAMÉTRICO USANDO A INTEGRAÇÃO GNSS/INS



FONTE: Adaptado e traduzido de Habib, Kersting e Bang (2010).

Na integração direta de sensor, os dados da IMU, bem como os do GNSS são utilizados como valores iniciais para o refinamento dos parâmetros de orientação exterior (POE) durante a aerotriangulação. Nesse processo, os valores de posição do GNSS e de orientação da IMU no instante da tomada das imagens, dos pontos de controle e das coordenadas fotogramétricas dos pontos de ligação são utilizados como observações e ponderados adequadamente na modelagem matemática. Assim, uma elevada qualidade da IMU não é necessária, pois seus valores serão ajustados. A seguir serão discutidos os dois cenários mais comuns do uso da integração do GNSS/INS no processo de mapeamento fotogramétrico.

2.3.1 Georreferenciamento Direto de Sensores

A determinação dos parâmetros de orientação exterior é um pré-requisito essencial para avaliação geométrica de qualquer imagem oriunda de sensores terrestres, aéreos ou satelitais. Tradicionalmente, a geocodificação ou georreferenciamento de imagens é resolvido de forma indireta utilizando pontos de controle no terreno e pontos fotogramétricos correspondentes nas imagens. Na Fotogrametria clássica, esta tarefa é resolvida através do procedimento fotogramétrico conhecido como aerotriangulação (AT) (CRAMER e TUTTGART, 1999).

O georreferenciamento direto utiliza as medidas diretas oriundas do GNSS/INS para transformar as coordenadas dos pontos no espaço imagem para as coordenadas no espaço objeto. Skaloud, Cramer e Schwarz (1996) apresentam a equação (8) correspondente a tal transformação.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix}_m + \lambda \cdot M_c^m(\omega, \varphi, \kappa, d\omega, d\varphi, d\kappa) \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ -f \end{bmatrix}_c \quad (8)$$

onde:

- (x_c, y_c) : são as coordenadas do ponto no espaço imagem, usualmente em milímetros, no referencial da câmera;
- f : distância focal da câmera, normalmente em milímetros;
- $[X, Y, Z]$: coordenadas do ponto no espaço objeto, em metros, no referencial Terreno;

- $[X_o, Y_o, Z_o]$: coordenadas do centro de perspectiva da câmera no referencial Terreno;
- $M_c^m(\omega, \varphi, \kappa, d\omega, d\varphi, d\kappa)$: matriz dos elementos da rotação entre o referencial da câmera e do Terreno; e
- λ : fator de escala do ponto.

O deslocamento posicional ou “braços” (dX , dY , dZ) na equação (9) representam a diferença entre a posição do centro de fase da antena GNSS, a origem do corpo da IMU e centro de perspectiva da câmera. Normalmente, eles são medidos antes da missão de voo com o uso de equipamentos topográficos (PINTO e FORLANI, 2002) ou mesmo fornecidos pelo fabricante. Contudo, na prática, existem deslocamentos residuais devido ao movimento relativo entre sensores montados, que se deslocam devido a vibração durante o voo. Estas correções podem ser parametrizadas (HE, 2012) ou absorvidas pelos POI (HABIB, KERSTING e BANG, 2010), (MITISHITA et al., 2016), durante a calibração *in situ* da câmera.

$$\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} X'_o \\ Y'_o \\ Z'_o \end{bmatrix}_m + M_b^m(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde:

- $[X'_o, Y'_o, Z'_o]$: coordenadas do centro do corpo da IMU no referencial Terreno;
- $[dX, dY, dZ]$: deslocamento posicional ou “braços” entre o CP da câmera e o centro do corpo da IMU; e
- $M_b^m(\omega, \varphi, \kappa)$: matriz dos elementos da rotação do corpo da IMU no referencial Terreno.

O desalinhamento angular ($d\omega$, $d\varphi$, $d\kappa$) da equação (10) é a diferença angular entre a orientação dos eixos da câmera fotogramétrica e a orientação dos eixos do corpo da IMU (JACOBSEN e WEGMANN, 2002). Tradicionalmente, a determinação deste desalinhamento consiste em comparar a atitude oriunda do GNSS/INS com o obtido da aerotriangulação (AT). Podendo ser realizado pela calibração a “dois passos”, onde a estimativa do desalinhamento é obtida para cada imagem separadamente e depois obtida pelo valor médio, ou pela introdução de um único valor

de desalinhamento como observações adicionais no ajustamento de bloco através do MMQ, conhecido como “um passo” (SKALLOUD e SCHAER, 2003).

$$M_c^m(\omega, \varphi, \kappa, d\omega, d\varphi, d\kappa) = M_b^m(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \Delta M_c^b(d\omega, d\varphi, d\kappa) \quad (10)$$

onde:

- $\Delta M_c^b(d\omega, d\varphi, d\kappa)$: matriz dos elementos da rotação do desalinhamento angular no referencial da IMU.

2.3.2 Orientação Integrada de Sensores

A orientação das imagens digitais oriundas dos POE, dentro de processos fotogramétricos, é de fundamental importância para a obtenção das coordenadas tridimensionais com exatidão posicional requerida. Durante anos, a execução do processo de aerotriangulação convencional foi a forma mais eficiente para a obtenção de tais orientações. Contudo, o advento do uso de GNSS/INS, que possibilita a obtenção direta dos parâmetros de orientação exterior, promoveu a inserção de novas observações no ajustamento de bloco. Assim, o uso de pontos de controle é somente necessário para eliminação dos erros sistemáticos do sistema integrado GNSS/INS ou oriundos de mudanças dos parâmetros de calibração durante o voo.

De acordo com Cramer e Stallmann (2001), a combinação entre os sistemas GNSS e INS possibilita uma elevada precisão na posição, velocidade e atitude da trajetória de voo uma vez que os dois sistemas são complementares. Uma série de estudos demonstrou a potencialidade do uso da integração GNSS/INS (ABDULLAH e TUTTLE, 1999; COLOMINA, 1999; CRAMER e TUTTGART, 1999; TOTH, 1999; JACOBSEN, 2000 e SKALLOUD e SCHWARZ, 2000).

Devido a relevância do tema, a OEEPE em 2002 apresentou uma publicação intitulada *Integrated Sensor Orientation – Official Publication Nº 43* contendo uma série de testes relacionados à avaliação do potencial da determinação da orientação integrada dos sensores com o uso de GPS/IMU. O objetivo do estudo se voltou para análise dos resultados da exatidão posicional no mapeamento de grande escala com o uso de câmeras de filme. A análise dos resultados obtidos com os experimentos levou em conta os seguintes cenários: aerotriangulação convencional, as observações dos POE oriundas do georreferenciamento direto GPS/IMU e combinação da aerotriangulação e orientação direta (integração da orientação direta).

Heipke, Jacobsen e Wegmann (2002) analisaram os resultados da qualidade posicional do georreferenciamento direto e da integração dos sensores. Segundo os autores, a introdução de pontos de ligação no segundo caso aumenta a acurácia das coordenadas no espaço objeto. Além disso, o papel do IMU nos dois casos é diferente. Para o georreferenciamento direto, os dados de orientação da IMU influenciam diretamente na qualidade posicional das coordenadas dos CP. Já para a integração dos sensores, a orientação pode ser refinada com o uso dos pontos fotogramétricos de ligação.

Ainda sobre o assunto, os autores enfatizam alguns argumentos a favor da introdução de dados IMU na orientação integrada dos sensores. São eles: - a utilização de dados IMU torna o uso de faixa cruzadas em mapeamentos uma solução obsoleta; - sem os dados IMU, faz-se necessário um significativo número de pontos de controle para o ajustamento das faixas; - a utilização dos dados da IMU, reduz a quantidade e distribuição dos pontos de ligação entre imagens; - uma vez disponibilizados os dados GPS/IMU, esses devem ser introduzidos na orientação integrada de sensores. Assim, os autores concluem que o uso dos dados IMU é indispensável para o georreferenciamento direto e traz benefícios para o mapeamento em voos integrados com GPS.

2.3.3 Calibração do Desalinhamento Angular IMU/Câmera

O desalinhamento angular entre a câmera e o corpo da IMU (*boresight misalignment angles*) é usualmente determinado por uma calibração a dois passos (*Two-step/2-step*) ou a um passo (*Single-step/1-step*). Na calibração a dois passos, o desalinhamento angular é obtido separadamente para cada imagem, e depois calculado pelo valor médio. Por outro lado, na calibração a um passo, os valores de orientação oriundos da IMU são introduzidos como observações no ajustamento de bloco, e os ângulos do desalinhamento angular são estimados como parâmetros.

Cramer, Stallmann e Haala (1999) desenvolveram um método iterativo a dois passos para determinação do desalinhamento angular, através da comparação entre os POE obtidos pela aerotriangulação e pelos derivados do GPS/IMU. Bäumker e Heimes (2001) propôs um método de calibração do desalinhamento angular, que considerou os três ângulos ($d\omega$, $d\phi$, dk) muito pequenos em uma matriz de rotação diferencial descrita na equação (11). LIU et al. (2011) propuseram um método rigoroso

a dois passos de calibração do desalinhamento angular baseado em três equações independentes de erros angulares, que serão discutidas na seção 3.3.6.

$$R_{d\omega, d\varphi, d\kappa} = \begin{bmatrix} 1 & d\kappa & -d\varphi \\ -d\kappa & 1 & d\omega \\ d\varphi & -d\omega & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

No método a um passo, os parâmetros de montagem do sistema, que incluem o desalinhamento angular, são estimados no ajustamento de bloco através do procedimento da orientação integrada de sensores (ISO), conforme descrito por (HABIB, KERSTING e BANG, 2010). De acordo com os autores, o método a um passo pode ser executado de duas formas diferentes. Na primeira, o modelo funcional mostrado na equação (8) é estendido com as equações de injunção descritas em (9) e (10) (WEGMANN, 2002 e SMITH et al., 2006). Na segunda forma, os parâmetros de montagem do sistema e observações derivadas do GNSS/INS são diretamente inseridos nas equações de colinearidade (PINTO e FORLANI, 2002; WANG, et al., 2012 e SIYING et al., 2012). De acordo com Habib, Kersting e Bang (2010), o método a um passo é considerado mais robusto no processamento das dependências entre os POE e POI, uma vez que os POI podem ser refinados juntamente com os parâmetros de montagem do sistema. Além disso, o método a um passo requer uma configuração geométrica das faixas de voo mais flexível.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados na presente pesquisa. O item 3.2 descreve as especificações técnicas dos levantamentos fotogramétrico e LIDAR utilizados na pesquisa. A seção 3.3 apresenta a metodologia proposta pela Tese.

3.2 LEVANTAMENTOS FOTOGRAMÉTRICO E LIDAR

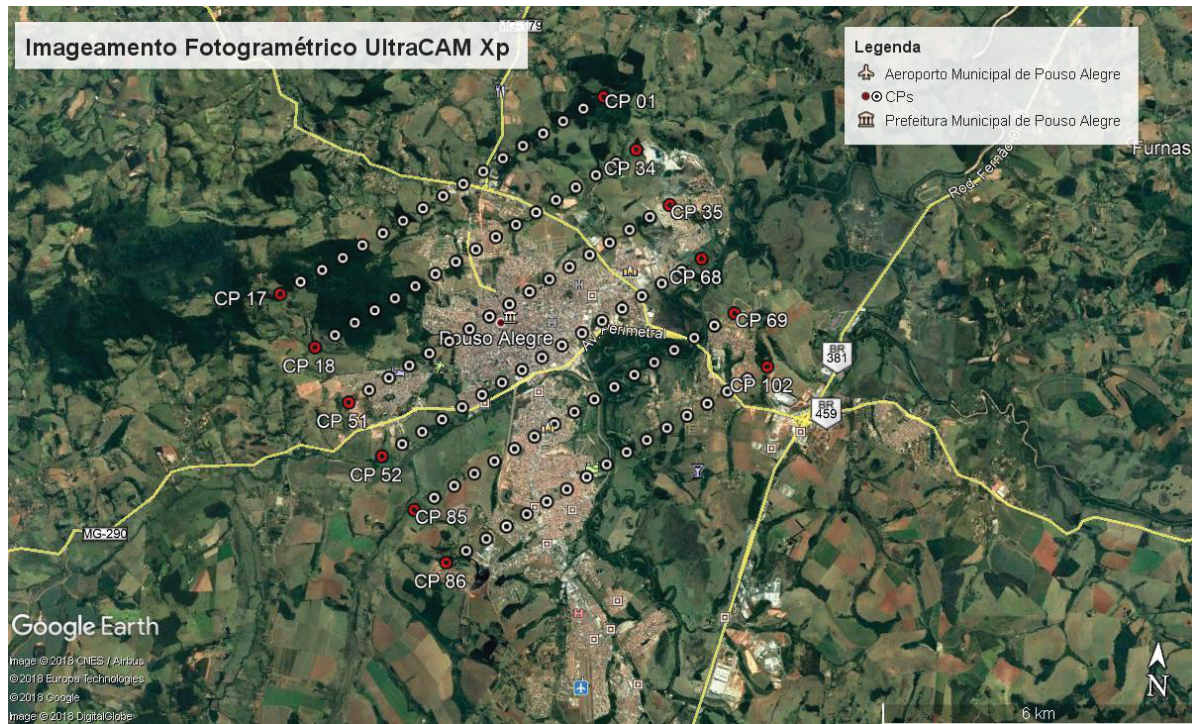
Dois voos independentes foram realizados em uma área de aproximadamente 74 km² na cidade de Pouso Alegre no Estado de Minas Gerais. No primeiro voo foi adquirido um bloco fotogramétrico de cento e duas imagens em maio de 2015, usando a câmera digital UltraCam XP (S/N UC-SXp-1-40813045), que é montada com Linos Vexcel Apo-Sironar Digital HR 5.6/100mm em uma altura de voo aproximada de 1.600 m. A imagem sintética gerada possui cerca de 195 milhões de pixels efetivos (11.310 × 17.310) pixels, com tamanho de pixel igual a 0,006 mm e com resolução do pixel no terreno igual próximo a 0,10 m.

A câmera UltraCam XP possui um Applanix GNSS/INS POS AV 310, que apresenta as seguintes precisões absolutas típicas do RTX pós-processado (REQM): Posição XY < 0,10 m; Posição Z < 0,20 m; *Roll* e *Pitch* < 0,015 graus; *Yaw* < 0,035 graus. O bloco possui seis faixas de voo adquiridas nas direções nordeste e sudoeste com sobreposição lateral de aproximadamente 30%. Cada faixa de voo possui dezessete imagens adquiridas com aproximadamente 60% de sobreposição longitudinal.

No segundo voo foi realizado o levantamento LIDAR em junho de 2015, usando o *Laser Scanner* ALS60 equipado com o Leica CUS6 IMU, que apresenta as seguintes precisões absolutas no pós-processamento (REQM): Posição < 0,3 m; *Roll* e *Pitch* < 0,0025 graus; *Yaw* < 0,005 graus. As faixas de voo LIDAR foram coletadas com densidade de pontos aproximada de 5 pontos/m². De acordo com as especificações do sensor, 0,20 m para planimetria e 0,15 m para altimetria são esperados para os dados LIDAR. A FIGURA 9 ilustra a região de imageamento com

a posição dos CP (em círculos brancos e vermelhos) das tomadas das imagens no *Google Earth Pro*.

FIGURA 9 - IMAGEAMENTO FOTOGRAMÉTRICO EM POUSO ALEGRE-MG



FONTE: O autor (2018).

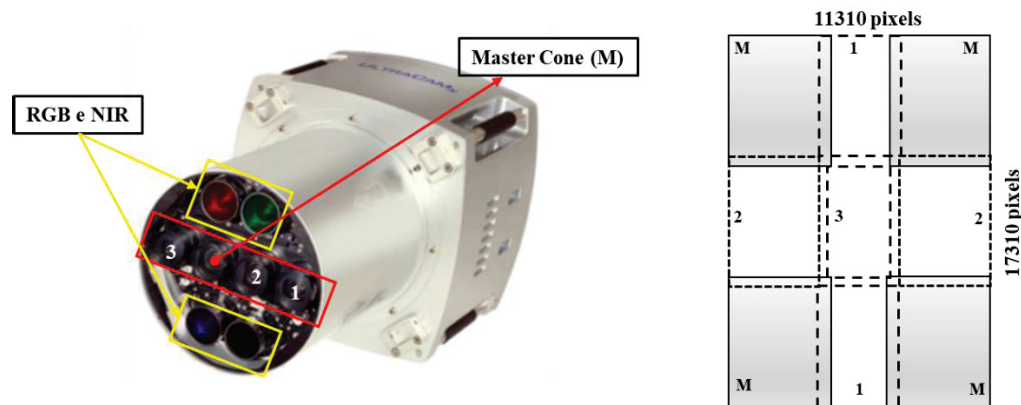
3.2.1 Sistema Fotogramétrico UltraCam Xp

A UltraCam Xp é um modelo de câmera aérea digital de grande formato produzida pela empresa *Vexcel Imaging GmbH* sob a direção da empresa *Microsoft Corp.* A câmera é baseada na tecnologia sintópica ou “mesma posição” (*syntopic imaging*), que envolve a criação de uma imagem sintética de grande formato a partir de câmeras de médio formato (GRUBER, 2007).

No sistema de sensores existe uma câmera principal ou mestre (*master*) que define as coordenadas. As câmeras secundárias ou escravas (*slaves*) são acionadas de forma sincronizada e sintópica em relação a mestre (LEBERL, GRUBER e PONTICELLI, 2003). A FIGURA 10 apresenta o sistema de câmeras UltraCam Xp (a esquerda) contendo oito câmeras, das quais quatro (retângulo vermelho) contribuem para formação da imagem pancromática de grande formato. Estas quatro câmeras possuem nove CCDs em seus planos ópticos. No processo de formação da imagem

(a direita), a câmera principal (M) contém quatro CCDs, a câmera (1) possui dois CCDs, a câmera (2) possui dois CCDs e a câmera (3) apresenta um CCD. Assim, é gerada uma imagem de (11.310×17.310) pixels.

FIGURA 10 - SENSOR ULTRACAMX e IMAGEM SINTÓPICA GERADA



FONTE: Adaptado e traduzido de Gruber e Ladstädter (2008).

3.2.2 Sistema LASER Scanner ALS60

O sistema ALS60 é um compacto laser aéreo produzido pela empresa *Leica Geosystems* para obtenção de modelos tridimensionais de superfície com maior rapidez e exatidão, sendo classificado na categoria LIDAR. Durante seu funcionamento, realiza-se a medição de posição (latitude, longitude e altitude) e atitude (*roll*, *pitch* e *yaw*) da aeronave, das distâncias ao terreno e dos ângulos de escaneamento para a obtenção da posição do ponto no terreno.

A FIGURA 11 ilustra alguns componentes do sistema ALS60 que são:

1. Conjunto escâner LS60;
2. Sistema eletrônico (LC60 controlador do laser + SC60 controladora do sistema);
3. Cabos de conexão;
4. OC52 interface do operador;
5. Placas isolantes dos conjuntos escâner e eletrônicos;
6. GNSS antena.

FIGURA 11 - COMPONENTES DO ALS60



FONTE: Geosystems (2008).

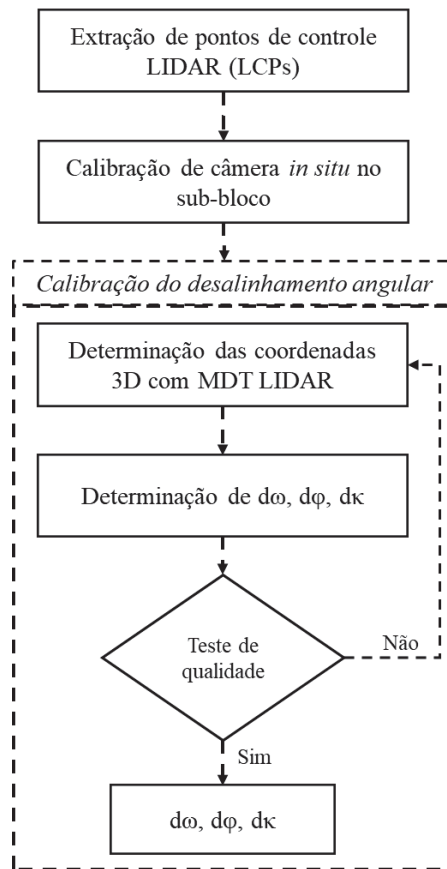
O sistema possui uma solução integrada de posição e atitude conhecidas como *Leica Inertial Position & Attitude System* (IPAS) na sua versão IPAS20. Destaca-se neste sistema a IMU CUS6 que apresenta a exatidão posicional entre 0,05-0,3 m, para Roll e Pitch $< 0,0025$ graus e Yaw $< 0,005$ graus.

3.3 METODOLOGIA

A metodologia proposta é baseada na integração de dados LIDAR com fotogramétricos através do georreferenciamento direto. Geralmente, os processos de mapeamento fotogramétrico utilizam a ISO (com ou sem pontos de controle) para minimização dos efeitos do desalinhamento linear entre IMU e câmera. Assim, esta pesquisa apresenta uma metodologia para determinação desse desalinhamento angular sem pontos de controle, com o uso do MDT oriundo da nuvem LIDAR, via georreferenciamento direto.

O método se baseia na calibração sequencial do sistema a um passo. O fluxograma é apresentado na FIGURA 12, onde a principal contribuição deste trabalho encontra-se na linha pontilhada. As principais etapas do estudo realizado são: i) Extração de pontos de controle LIDAR (LCPs), que incluem também os de verificação; ii) Calibração *in situ* da câmera usando o sub-bloco de imagens; iii) Determinação das coordenadas 3D dos pontos fotogramétricos com o MDT LIDAR, através das equações de colinearidade na forma inversa; iv) Calibração do desalinhamento angular baseado nas equações de colinearidade na forma direta.

FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA



FONTE: O autor (2018).

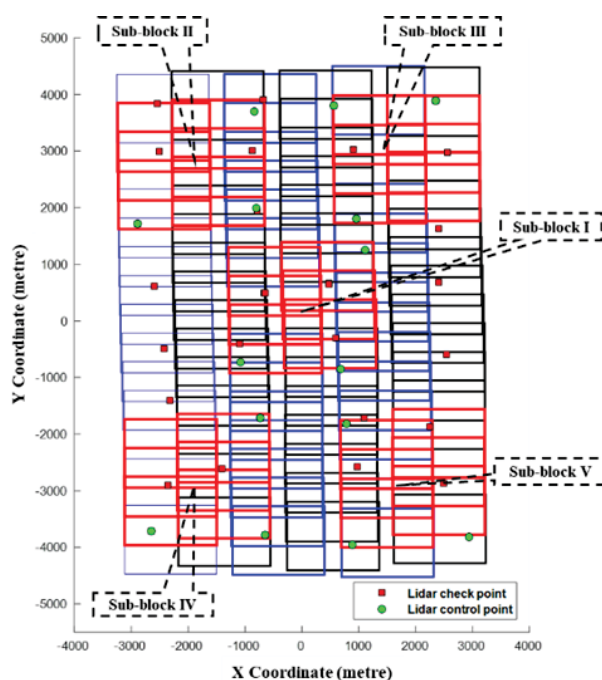
3.3.1 Seleção do Bloco/Sub-Bloco de Estudo

Primeiramente foi selecionado um bloco fotogramétrico oriundo de um voo simultâneo ou não com sistema LIDAR. Para voos não simultâneos, os dois sensores devem possuir tecnologia de georreferenciamento direto de modo que se tenha, no caso fotogramétrico, a posição e atitude da câmera no instante da tomada de cada foto.

Visando obter uma configuração de imagens com geometria mínima e necessária para a determinação dos parâmetros de montagem do sistema, que incluem o desalinhamento angular e dos POI *in situ*, será escolhido um sub-bloco que contenha ao menos três imagens em cada faixa com diferentes sentidos de voo. O uso de sub-bloco de imagens para a realização da calibração *in situ* foi proposta por (MITISHITA et al., 2016) para melhorar o desempenho da ISO. Os resultados mostraram uma melhoria na exatidão posicional dos pontos de verificação com o uso dos POI calibrados.

Costa, Mitishita e Marlo (2018) conduziram um estudo da influência da posição do sub-bloco extraído de um bloco fotogramétrico na estimativa dos POI da calibração *in situ* para serem usados no processamento da ISO. Cinco sub-blocos em diferentes regiões foram extraídos de todo o bloco para a determinação dos POI da calibração *in situ*. A FIGURA 13 mostra a posição dos sub-blocos (I-V) e LCPs de controle e verificação ao longo do bloco fotogramétrico.

FIGURA 13 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO, DOS CINCO SUB-BLOCOS E DISTRIBUIÇÃO DOS LCPS DE CURITIBA-PR



FONTE: Costa, Mitishita e Marlo (2018).

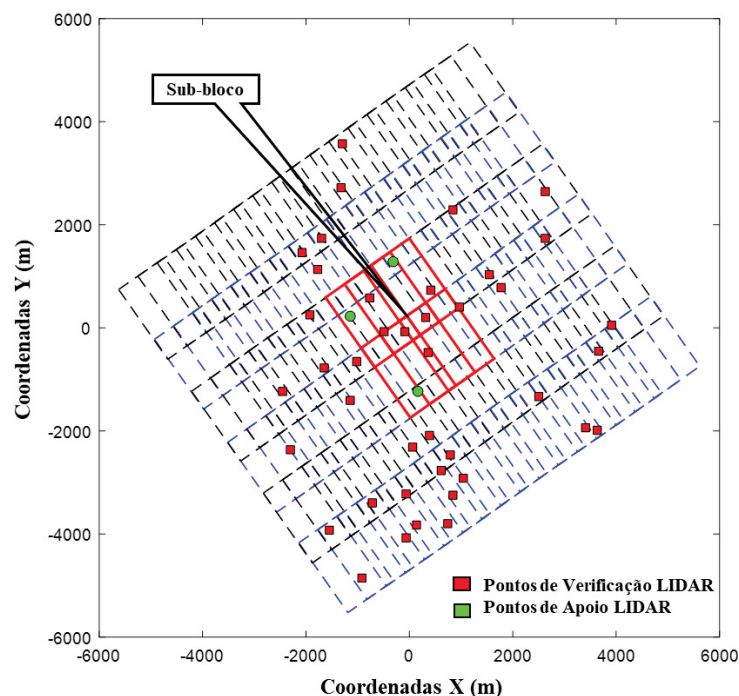
Em seguida, foram processadas cinco calibrações utilizando LCPs obtidos a partir da interseção de três planos dos telhados das edificações. As medidas diretas de posição e orientação da câmera oriundas do GNSS/INS foram usadas como pseudo-observações e ponderadas nas calibrações, de acordo com as precisões nominais do equipamento Applanix GNSS/INS POS AV 510 (posição XY < 0,05 m; posição Z < 0,10 m; *roll* e *pitch* ≤ 0,005 graus; *yaw* ≤ 0,008 graus).

Por fim, foram processadas cinco ISO visando o refinamento dos POE da determinação direta do sistema GNSS/INS com o uso dos POI *in situ* das cinco calibrações. Assim, verificou-se através das exatidões posicionais dos LCPs de verificação qual sub-bloco foi o mais representativo do todo o bloco fotogramétrico.

Os resultados do estudo indicaram que os POI obtidos na calibração do sub-bloco localizado na porção central forneceram os melhores REQMs posicionais dos 37 pontos de verificação. Além disso, os POE das imagens do bloco fotogramétrico foram refinados nos experimentos das ISO sem pontos de controle.

Considerando o estudo realizado por Costa, Mitishita e Marlo (2018), esta pesquisa partiu da premissa que os POI oriundos da calibração de um sub-bloco localizado na região central do bloco melhora a integração dos dados fotogramétricos e LIDAR no georreferenciamento direto. Assim, foi escolhido um sub-bloco contendo seis imagens (três em cada sentido de voo) para a realização da calibração *in situ* na região central do município de Pouso Alegre-MG. A área do bloco fotogramétrico, com o respectivo sub-bloco e os pontos LCPs de controle e verificação extraídos podem ser visualizados na FIGURA 14. Como pode ser observado, a distribuição dos pontos não foi homogênea devido ao fato de o município ser rural e apresentar áreas com vegetação que inviabilizou a extração de LCPs.

FIGURA 14 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO, SUB-BLOCO E PONTOS LCPS DE POUSO ALEGRE-MG



FONTE: O autor (2018).

3.3.2 Extração de Pontos de Controle LIDAR

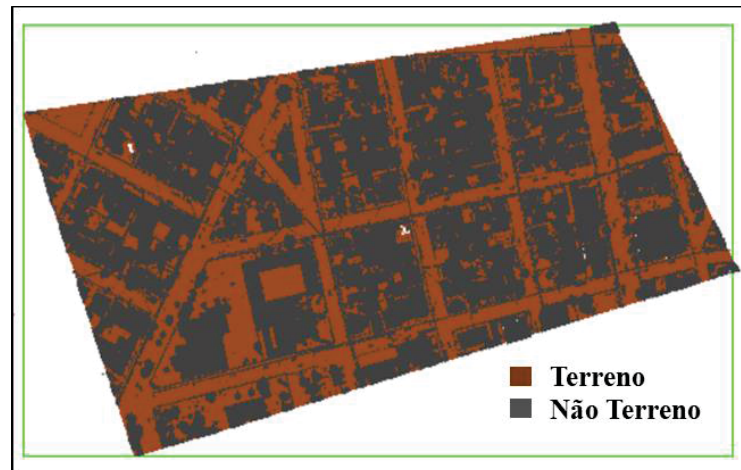
Os pontos de controle LIDAR (LCPs) são considerados nesta pesquisa como referência posicional para fixação dos dados fotogramétricos e LIDAR no mesmo sistema de coordenadas de mapeamento. Eles são usados para a execução da calibração *in situ* da câmera. Conforme descrito em 2.1.2, há muitos métodos de extração de feições pontuais a partir da nuvem ou das imagens de intensidade LIDAR. A metodologia usada neste estudo é baseada na extração semiautomática de feições pontuais a partir da interseção de três planos das águas de telhados. O procedimento é realizado em quatro etapas.

3.3.2.1 Filtragem dos Pontos LIDAR Localizados em Telhados

A primeira etapa consiste na identificação visual de áreas residenciais. Usando as imagens de intensidade juntamente com as fotogramétricas, pequenas regiões da nuvem são selecionadas. Estas áreas devem conter uma ou mais edificações com telhados contendo três ou mais águas.

Na sequência, os pontos LIDAR contidos nos telhados são filtrados automaticamente através do aplicativo LAsTools. LAsTools é uma biblioteca de rotinas, desenvolvidas na linguagem C ++, frequentemente usada para processar e manipular dados LIDAR no formato *.las (HUG, KRZYTEK e FUCHS, 2004 e ISENBURG, 2016).

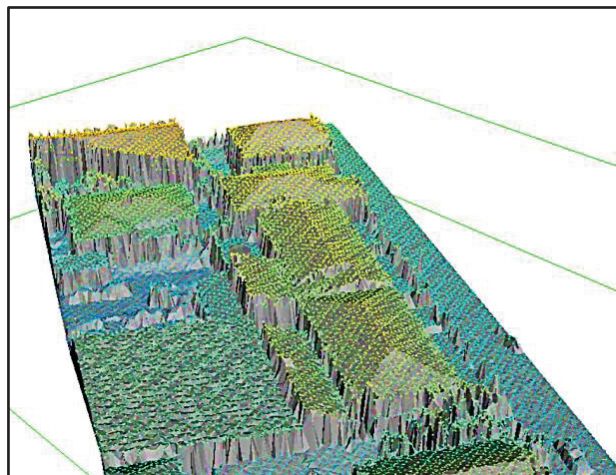
No ambiente LAsTools, os pontos LIDAR localizados nos telhados são filtrados através de três rotinas: *lasground*, *lasheight* e *lasclassify*, executados sequencialmente. No *lasground*, os dados LIDAR são separados em dois conjuntos de pontos: terreno e não-terreno. A variação de desnível é analisada em pequenas áreas para a filtragem. A FIGURA 15 ilustra os resultados da classificação da rotina em uma quadra residencial. Como pode ser observado, duas classes são geradas, Terreno (MDT) e a Não Terreno (vegetação, edificações, etc).

FIGURA 15 - RESULTADOS OBTIDOS NA CLASSIFICAÇÃO USANDO A ROTINA *LASGROUND*

FONTE: O autor (2018).

No próximo passo, a rotina *lasheight* é usada para refinar a classificação dos pontos não-terreno oriundos da *lasground*. Assim, uma triangulação irregular é gerada e uma filtragem baseada em um limiar de altura é realizada. Considerando as edificações das áreas de estudo, limiares entre 2 e 10 metros foram usados para filtrar os pontos LIDAR da nuvem. A FIGURA 16 apresenta a triangulação irregular (TIN) dos pontos LIDAR classificados como telhados ou copa de árvores.

FIGURA 16 - TRIANGULAÇÃO IRREGULAR (TIN) DOS TELHADOS

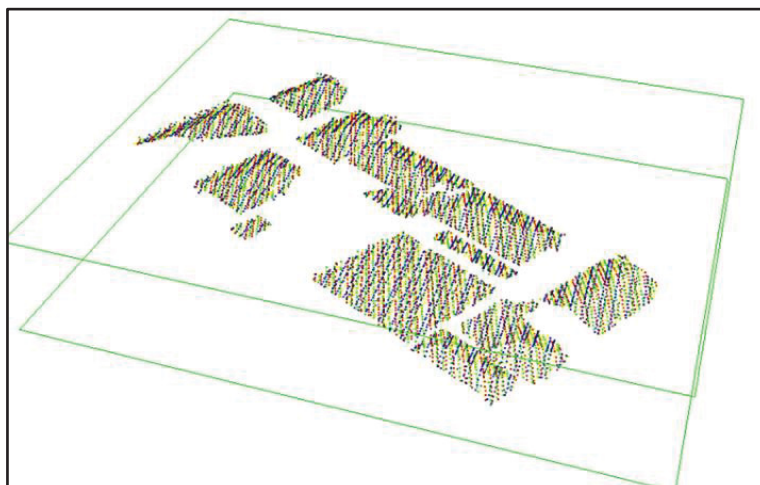


FONTE: Costa, Mitishita e Centeno (2017).

Na sequência, a rotina *lasclassify* foi executada para agrupamento dos pontos filtrados nos processos anteriores em classes. A rotina realiza o ajustamento de planos visando achar a vizinhança dos pontos por crescimento de regiões e pô-los em

classes específicas. Finalmente, todos pontos LIDAR nos telhados são classificados na classe 6 (padrão do aplicativo). Embora a rotina possibilite a extração dos planos dos telhados, não há a separação dos planos das águas dos telhados. Os pontos classificados na classe 6 podem ser vistos na FIGURA 17.

FIGURA 17 - PONTOS DA NUVEM LIDAR DE UMA ÁREA RESIDENCIAL CLASSIFICADOS COMO TELHADOS



FONTE: Costa, Mitishita e Centeno (2017).

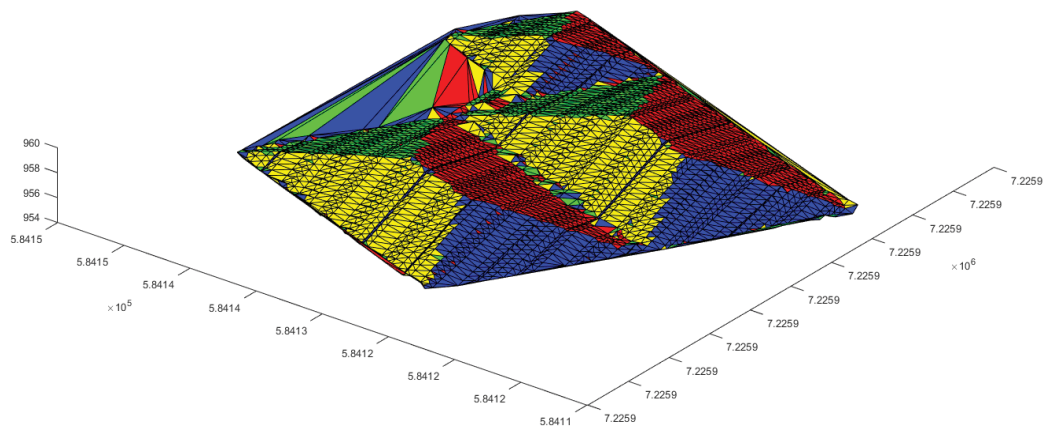
3.3.2.2 Extração dos Planos das Águas dos Telhados

Nesta etapa, os pontos classificados como telhados são separados nos planos específicos das águas que os constituem. O algoritmo desenvolvido por (MITISHITA, E. A. e CENTENO, 2015) foi usado para realizar essa separação e a metodologia similar ao método *mean-shift*, introduzido por (COMANICIU e MEER, 2002).

Primeiramente, a rotina lê o arquivo ASCII contendo as coordenadas dos pontos LIDAR nos telhados, que foram classificadas pelo LAStools. Então, uma triangulação de Delaunay é executada para uma análise da vizinhança dos pontos. Utilizando a lista de triângulos, os vetores normais e as direções (G_x , G_y , G_z) são calculados para todos eles. Os valores x e y das componentes de todos os vetores são usados para construir um histograma normal com as frequências dos gradientes. Em seguida, uma análise do histograma é feita para identificar os picos mais representativos dos vetores direcionais. Assim, é realizada uma classificação dos triângulos pertencentes as suas respectivas águas de acordo com os valores (G_x , G_y)

das componentes x e y mais significativos da vizinhança. Um arquivo ASCII é gerado contendo as coordenadas (X, Y, Z) dos centroides dos triângulos, bem como suas classes. Este arquivo é usado na próxima fase para definição das equações dos planos das águas. A FIGURA 18 mostra três telhados, que são classificados em quatro classes coloridas em amarelo, azul, verde e vermelho.

FIGURA 18 - VISUALIZAÇÃO 3D DOS TRIÂNGULOS DE DELAUNAY CLASSIFICADOS



FONTE: Costa, Mitishita e Centeno (2017).

3.3.2.3 Modelagem dos Planos das Águas

A partir dos pontos classificados na seção anterior, os planos das águas dos telhados são determinados através de um ajustamento MMQ (GEMAEL, 1994 e GHILANI, 2010). Os modelos funcionais mais comuns para a representação do plano são representados nas equações (12) e (13), onde (X, Y, Z) são as coordenadas dos pontos LIDAR no referencial geodésico e (A, B, C, D) são parâmetros.

$$A.X + B.Y + C.Z + D = 0 \quad (12)$$

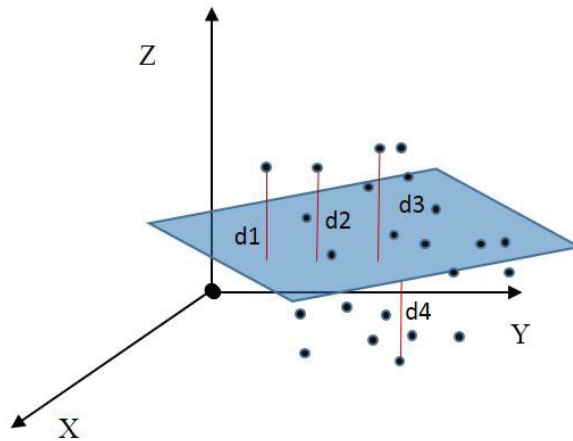
$$Z = A.X + B.Y + C \quad (13)$$

Kunz (2014) apresentou as influências das equações (12) e (13) na representação de diferentes espaços Euclidianos em R3. O autor concluiu que a equação (12) é mais aplicável para superfícies oriundas de modelos digitais com

muitas variações de declividade, enquanto a (13) é mais usada para dados 2,5D (nuvem de pontos LIDAR) devido a sua aplicação em uma solução local.

A modelagem dos planos das águas desenvolvida para a pesquisa foi baseada na minimização das distâncias verticais usando a equação (13). Assim, o plano da água que melhor se ajuste ao conjunto de pontos da sua classe é calculado. A FIGURA 19 ilustra um conjunto de pontos LIDAR com o plano melhor ajustado. Como pode ser observado, a aplicação do método para definição do plano requer um número mínimo de quatro pontos LIDAR para o ajustamento MMQ ($\sum_{i=1}^4 d_i^2 \sim \text{mínimo}$).

FIGURA 19 - ILUSTRAÇÃO DO PLANO AJUSTADO PARA OS PONTOS DA NUVEM LIDAR



FONTE: Costa, Mitishita e Centeno (2017).

A equação (14) pode ser reescrita na sua forma implícita (y) de modo a se realizar o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados para o cálculo dos parâmetros (A, B, C).

$$A.X + B.Y + C - Z = 0 \quad (14)$$

Durante o ajustamento MMQ, as coordenadas UTM dos pontos LIDAR causaram um mau condicionamento de matrizes o que implicou na singularidade do sistema de equações normais. Para estabilizar o ajustamento, as coordenadas UTM foram normalizadas pelas equações (15) e (16), que são uma adaptação do método proposto por (TAO e HU, 2001). Friess (2006) e Kunz (2014) apresentam outras soluções para a otimização do ajustamento.

$$X_n = \frac{X - X_m}{S_x}, \quad Y_n = \frac{Y - Y_m}{S_y}, \quad Z_n = \frac{Z - Z_m}{S_z} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} S_x &= \text{Max}(|\text{Max}(X) - X_m|, |\text{Min}(X) - X_m|) \\ S_y &= \text{Max}(|\text{Max}(Y) - Y_m|, |\text{Min}(Y) - Y_m|) \\ S_z &= \text{Max}(|\text{Max}(Z) - Z_m|, |\text{Min}(Z) - Z_m|) \end{aligned} \quad (16)$$

onde:

(X, Y, Z) são as coordenadas dos pontos LIDAR em UTM; (X_m, Y_m, Z_m) são as coordenadas medias de (X, Y, Z); (S_x, S_y, S_z) são os fatores de escala para as coordenadas (X, Y, Z); (X_n, Y_n, Z_n) são as coordenadas normalizadas.

A matriz de peso das coordenadas dos pontos LIDAR foi baseada nas precisões nominais para as componentes horizontal e vertical, respectivamente, 20 cm e 15 cm. A qualidade do ajustamento é baseada na MVC dos parâmetros ajustados discutidos na seção a seguir. Normalmente, o processo iterativo para determinação do ponto não ultrapassa dez iterações.

3.3.2.4 Interseção dos Planos das Águas (Determinação do LCP)

Considerando as equações descritas em (17) como as equações dos planos de três águas do telhado, a interseção dos três planos define o ponto LCP, que é a cumeeira do telhado.

$$\begin{cases} A_1 \cdot X_i + B_1 \cdot Y_i + C_1 - Z_i = 0 \\ A_2 \cdot X_i + B_2 \cdot Y_i + C_2 - Z_i = 0 \\ A_3 \cdot X_i + B_3 \cdot Y_i + C_3 - Z_i = 0 \end{cases} \quad (17)$$

onde:

- (X_i, Y_i, Z_i) são as coordenadas 3D do ponto LCP obtido pela interseção dos planos;
- (A₁, B₁, C₁, A₂, B₂, C₂, A₃, B₃, C₃) são os parâmetros dos planos 1, 2 e 3.

Assim, (X_i, Y_i, Z_i) são obtidos pela equação (18).

$$[X_i \quad Y_i \quad Z_i]^T = -(A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (18)$$

onde:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & -1 \\ A_2 & B_2 & -1 \\ A_3 & B_3 & -1 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}$$

Como a solução do sistema de equações (17) é determinística, a MVC das coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) determinadas é baseada na lei de propagação de erros dos parâmetros ($A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, A_3, B_3, C_3$) calculados na subseção 3.3.2.3 e dada pela equação (19):

$$\Sigma_{X_i Y_i Z_i} = G \cdot \Sigma_{C_1 C_2 C_3} \cdot G^T \quad (19)$$

onde:

$G = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T$ e $\Sigma_{C_1 C_2 C_3}$ é a MVC dos parâmetros C_1, C_2, C_3 .

3.3.3 Calibração *in Situ* de Câmera Utilizando Sub-bloco

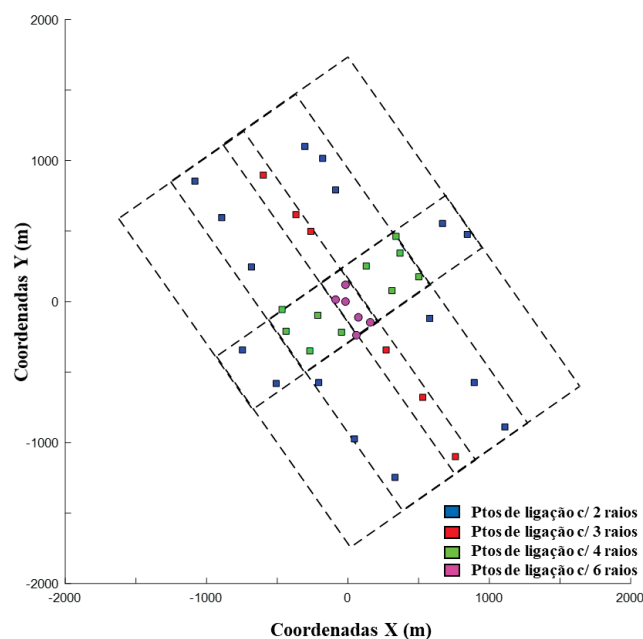
A calibração *in situ* visa estimar os POI da câmera UltraCam Xp nas condições de voo. Diferentemente dos processos tradicionais, este trabalho utiliza pontos de controle LIDAR e um pequeno sub-bloco de imagem extraído do bloco de imagens obtido no levantamento aéreo para a realização do projeto fotogramétrico. Além disso, o processo não requer um campo de calibração. Assim, a calibração foi realizada usando um sub-bloco localizado no centro do bloco como sugerido por (COSTA, MITISHITA e MARLO, 2018), com seis imagens contidas em duas faixas de voo opostas (três em cada faixa). Mitishita et al. (2016) propuseram o uso de um sub-bloco de imagens para realizar a calibração *in situ* de câmera para refinamento da ISO. Os resultados do trabalho mostraram um aumento na qualidade planialtimétrica dos pontos de verificação após a utilização dos POI da calibração *in situ*. Na pesquisa, três LCPs não alinhados foram utilizados para realização da calibração, conforme descrito em (MITISHITA, COSTA e MARLO, 2017).

Assim, utilizando as equações de colinearidade (equações (2) e (3) e ajustamento MMQ, a condição teórica de colinearidade entre o ponto no espaço imagem, no espaço objeto e a posição do CP é reconstituída com o uso de parâmetros adicionais. Tais parâmetros estão relacionados às distorções da lente da câmera, coordenadas do ponto principal e distorções do sensor (BROWN, 1971). Mitishita et

al. (2012) e Gneeniss, Mills e Miller (2015) apresentam detalhes sobre os principais passos para a realização da calibração *in situ* usando diferentes câmeras digitais.

Aproximadamente trinta e oito pontos fotogramétricos, próximos às regiões de *Von Gruber*, foram medidos automaticamente no aplicativo *Leica Photogrammetry Suite* (LPS) 2011. A seleção destes pontos no sub-bloco foi baseada no número de raios contidos por cada um deles. Uma vez que a qualidade das coordenadas do ponto no espaço objeto é aumentada com mais raios, os pontos fotogramétricos foram escolhidos em regiões planas e contínuas, preferencialmente, contendo pelo menos três raios. A FIGURA 20 mostra a distribuição dos pontos fotogramétricos após a extração automática. Como pode ser visto, a maioria dos pontos se encontram em regiões com mais de três imagens. Contudo, pontos com dois raios são necessários para a obtenção da orientação relativa entre as imagens na mesma faixa.

FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS DE LIGAÇÃO NO SUB-BLOCO



FONTE: O autor (2018).

Além dos pontos fotogramétricos, as medidas das posições e atitudes dos CPs derivados dos sensores GNSS/INS foram utilizados para a calibração *in situ*. As precisões nominais dos equipamentos foram introduzidas no ajustamento em bloco como injunções de peso (posição < 0,15 m; *Roll* e *Pitch* < 0,015 graus; *Yaw* < 0,035 graus).

3.3.4 Determinação das Coordenadas 3D pela Equação de Colinearidade Inversa

A restituição monocular digital é o procedimento fotogramétrico que possibilita a obtenção das coordenadas tridimensionais (X, Y, Z), a partir das coordenadas fotogramétricas (x, y), das equações de colinearidade inversa e de um modelo digital de terreno (MDT). Esta técnica é equivalente ao procedimento de restituição estereofotogramétrica, desde que o modelo digital de terreno apresente uma elevada exatidão altimétrica.

Empregando o procedimento fotogramétrico de restituição monocular, os pontos fotogramétricos homólogos são projetados para o espaço objeto, utilizando as equações de colinearidade inversa descritas em (20).

$$\begin{cases} X - X_o = (Z - Z_o) \cdot \frac{m_{11}(x - x_o) + m_{21}(y - y_o) + m_{31}(-f)}{m_{13}(x - x_o) + m_{23}(y - y_o) + m_{33}(-f)} \\ Y - Y_o = (Z - Z_o) \cdot \frac{m_{12}(x - x_o) + m_{22}(y - y_o) + m_{32}(-f)}{m_{13}(x - x_o) + m_{23}(y - y_o) + m_{33}(-f)} \end{cases} \quad (20)$$

onde:

- (x, y): são as coordenadas do ponto no espaço imagem, usualmente em milímetros, no referencial da câmera;
- (x_o, y_o): coordenadas do ponto principal da câmera no referencial do espaço imagem;
- f : distância focal da câmera, normalmente em milímetros;
- [X, Y, Z]: coordenadas do ponto no espaço objeto, em metros, no referencial de mapeamento;
- [X_o, Y_o, Z_o]: coordenadas do centro de perspectiva da câmera no referencial mapeamento; e
- m_{ij} : elementos da matriz de rotação dos ângulos de orientação da câmera no referencial mapeamento.

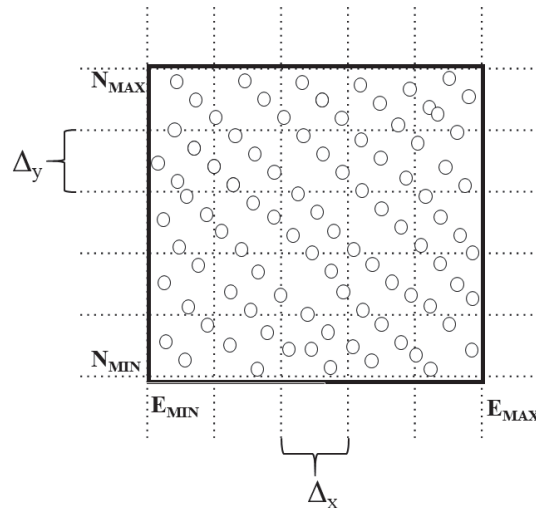
Assim, um algoritmo foi desenvolvido visando a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos fotogramétricos de ligação medidos nas imagens do sub-bloco utilizado para a calibração dos POI. Neste procedimento são utilizados os POI da câmera (oriundos da calibração *in situ* ou de fábrica), os POE de

cada imagem (obtidos pelo georreferenciamento direto GNSS/INS) e a coordenada Z oriunda do MDT gerado na subseção 3.3.2.1.

No início do processo, o valor médio das coordenadas verticais do MDT LIDAR foi usado como estimativa para a coordenada Z. Assim, obtém-se as coordenadas 2D (X, Y) do ponto de interesse. Na próxima iteração, o algoritmo refina a coordenada Z, buscando a componente vertical mais próxima a (X, Y) no MDT. A solução é iterativa e a convergência ocorre quando a diferença entre as coordenadas 3D calculadas da iteração “i” e da iteração “i-1” estiver abaixo de um certo limiar, para o caso 0,20 m (precisão nominal da posição do LIDAR).

Durante o desenvolvimento do algoritmo de determinação das coordenadas, observou-se a necessidade de uma estratégia para o manuseio de milhões pontos da nuvem LASER. A estratégia foi baseada em (MACHADO, 2006) que divide a nuvem MDT em células bidimensionais contendo menos pontos. Assim, cada ponto fotogramétrico com as coordenadas (X, Y) é classificado em uma célula com as coordenadas (C, L) de acordo com as equações (21)-(23). A FIGURA 21 apresenta a divisão da nuvem LIDAR em células bidimensionais.

FIGURA 21 – DIVISÃO DA NUVEM DE PONTOS EM CÉLULAS



FONTE: O autor (2018).

$$\begin{cases} C = (\text{Trunc}(X - E_{\text{Min}})/\Delta_x) + 1 \\ L = (\text{Trunc}(Y - N_{\text{Min}})/\Delta_y) + 1' \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \Delta_x = (E_{\text{Max}} + dE - E_{\text{Min}})/K_x \\ \Delta_y = (N_{\text{Max}} + dN - N_{\text{Min}})/K_y, \end{cases} \quad (22)$$

$$K_x = K_y = \sqrt{\frac{\text{Número total de pontos}}{\text{Quantidade média de pontos por célula}}} \quad (23)$$

onde:

- C, L: são a coluna e linha da célula no grid correspondente a coordenada (X, Y) do ponto fotogramétrico ($C \in [1, K_x]$, $L \in [1, K_y]$);
- E_{Max} , E_{Min} , N_{Max} , N_{Min} são, respectivamente, o máximo e o mínimo das coordenadas nas direções Leste e Nore da nuvem de pontos;
- Δ_x , Δ_y são os tamanhos das células nos eixos “x” e “y”;
- K_x , K_y as quantidades de células nos eixos “x” e “y”.
- dE , dN são números pequenos utilizados para garantir o fechamento de intervalo (um percentual de E_{Min} e N_{Min}).

Após um estudo empírico, foi desenvolvido a calibração do desalinhamento angular baseada nos pontos de controle virtuais LIDAR (VLCPs). Os VLCPs são pontos, cujas coordenadas são estimadas pela média aritmética das coordenadas dos pontos fotogramétricos projetados no MDT LIDAR. Uma vez que as coordenadas tridimensionais dos pontos fotogramétricos foram estimadas para cada imagem, os VLCPs podem ser determinados de acordo com as equações (24).

$$\begin{cases} X_P = (X_{P1} + X_{P2} + X_{P3} + \dots + X_{Pn})/(n) \\ Y_P = (Y_{P1} + Y_{P2} + Y_{P3} + \dots + Y_{Pn})/(n) \\ Z_P = (Z_{P1} + Z_{P2} + Z_{P3} + \dots + Z_{Pn})/(n) \end{cases} \quad (24)$$

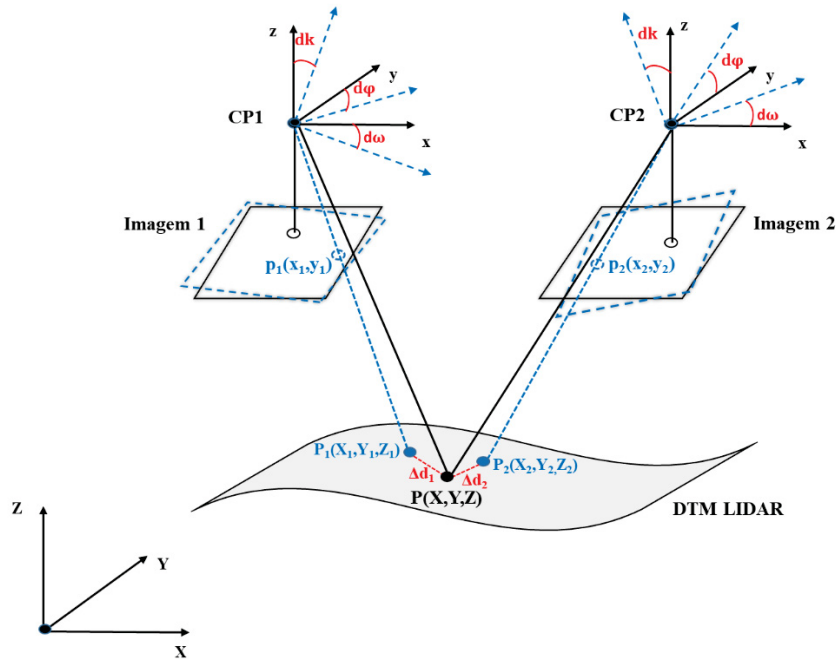
onde:

- P_i ($i=1,2,3\dots n$; $n \geq 2$) é a projeção do ponto fotogramétrico P para cada imagem “i” no MDT LIDAR.

A FIGURA 22 ilustra a projeção no MDT LIDAR do VLCP “P”, cujas coordenadas (X, Y, Z) são obtidas a partir da média aritmética das coordenadas de P_1 (X_1, Y_1, Z_1) e P_2 (X_2, Y_2, Z_2), que foram projetados no MDT LIDAR. Como pode ser observado, o efeito dos *boresight angles* ($d\omega$, $d\phi$, dk) impede a interseção

fotogramétrica devido aos deslocamentos Δd_1 e Δd_2 . Assim, a melhor estimativa das coordenadas de P é a média aritmética das coordenadas de P_1 e P_2 .

FIGURA 22 – PROJEÇÃO DO PONTO VLCP NO MDT LIDAR



FONTE: O autor (2018).

A coordenadas dos VLCPs geradas a partir dos pontos fotogramétricos contidos na FIGURA 20 serão utilizadas na subseção a seguir.

3.3.5 Determinação do Desalinhamento Angular pela Metodologia Proposta

A determinação do desalinhamento angular pela metodologia proposta é a principal contribuição do estudo, pois visa a integração de dados fotogramétricos e LIDAR, sem pontos de apoio, com o uso do MDT da região. O método está baseado em um processo iterativo, onde as coordenadas dos VLCPs, obtidas na seção anterior, são inseridas nas equações (2) e (3) de colinearidade direta para cálculo dos ângulos do desalinhamento angular (*boresight misalignment angles*) entre IMU e Câmera. Adicionalmente, foi realizada a determinação do desalinhamento angular pelo método a dois passos para comparação com os resultados pelo método proposto.

Os elementos conhecidos nas equações de colinearidade são as medidas dos pontos fotogramétricos no referencial fotogramétrico sem distorções, os POI da

calibração *in situ* ou de fábrica, os POE dos centros de perspectivas das imagens do sub-bloco derivados do GNSS/INS e os pontos de controle virtuais LIDAR (VLCPs). Na modelagem de calibração, dois cenários de desalinhamento angular foram considerados.

O primeiro cenário considerou um único valor de desalinhamento angular ($d\omega$, $d\phi$, dk) para todo o sub-bloco. Assim, para cada ponto fotogramétrico, duas equações (25) podem ser escritas após a linearização de Taylor.

$$\begin{cases} V_x = F_{x0} + \frac{\partial F_{x0}}{\partial d\omega} \Delta d\omega + \frac{\partial F_{x0}}{\partial d\phi} \Delta d\phi + \frac{\partial F_{x0}}{\partial dk} \Delta dk, \\ V_y = F_{y0} + \frac{\partial F_{y0}}{\partial d\omega} \Delta d\omega + \frac{\partial F_{y0}}{\partial d\phi} \Delta d\phi + \frac{\partial F_{y0}}{\partial dk} \Delta dk \end{cases} \quad (25)$$

Devido às limitadas sobreposições lateral (27,53%) e longitudinal (58,16%) do sub-bloco de estudo, um segundo cenário foi modelado, que considerou valores de *boresight angles* para cada sentido de voo: ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) para direção NE e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) para SO. Assim, duas equações (26) podem ser obtidas após a linearização.

$$\begin{cases} V_x = F_{x0} + \frac{\partial F_{x0}}{\partial d\omega_1} \Delta d\omega_1 + \frac{\partial F_{x0}}{\partial d\phi_1} \Delta d\phi_1 + \frac{\partial F_{x0}}{\partial dk_1} \Delta dk_1 + \frac{\partial F_{x0}}{\partial d\omega_2} \Delta d\omega_2 + \frac{\partial F_{x0}}{\partial d\phi_2} \Delta d\phi_2 + \frac{\partial F_{x0}}{\partial dk_2} \Delta dk_2 \\ V_y = F_{y0} + \frac{\partial F_{y0}}{\partial d\omega_1} \Delta d\omega_1 + \frac{\partial F_{y0}}{\partial d\phi_1} \Delta d\phi_1 + \frac{\partial F_{y0}}{\partial dk_1} \Delta dk_1 + \frac{\partial F_{y0}}{\partial d\omega_2} \Delta d\omega_2 + \frac{\partial F_{y0}}{\partial d\phi_2} \Delta d\phi_2 + \frac{\partial F_{y0}}{\partial dk_2} \Delta dk_2 \end{cases}, \quad (26)$$

onde:

- F_{x0} e F_{y0} são os valores iniciais da expansão de Taylor;
- Os termos restantes são as derivadas de primeira ordem de ($d\omega$, $d\phi$, dk) para o primeiro cenário, ou ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1 , $d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2), para o segundo.

A solução é obtida através de um ajustamento MMQ, em que a cada iteração do processo, as correções do desalinhamento angular são reintroduzidas na seção 3.3.4 para melhoria da orientação exterior do sub-bloco. Então, novas coordenadas dos VLCPs são calculadas para serem usados como pontos de controle. O processo é interrompido quando as diferenças do desalinhamento angular da atual iteração com os obtidos pela iteração anterior forem inferiores a um certo limiar. O valor limiar usado foi de 0,005 arcos de grau (18 arcos de segundos), que é um valor admissível para a precisão ruído do sistema IMU (MOSTAFA, 2002).

3.3.6 Determinação do Desalinhamento Angular pelo Método a Dois Passos

De forma similar à seção anterior, dois cenários para determinação dos *boresight angles* foram considerados no método a dois passos. O objetivo destes experimentos é comparar os resultados do método a dois passos com aqueles obtidos pelo método proposto.

Após a calibração *in situ* da câmera no sub-bloco, novos POE foram calculados para as seis imagens. Assim, o desalinhamento angular é calculado pela diferença do georreferenciamento direto e indireto. A modelagem matemática utilizada para a determinação do desalinhamento angular é baseada no método proposto por (LIU et al., 2011), que utiliza três equações de observação (27) para cada imagem a seguir:

$$\begin{cases} \omega_{IMU} = -\arctan\left(\frac{M_{b\ 32}^m}{M_{b\ 33}^m}\right) \\ \varphi_{IMU} = \arcsin(M_{b\ 31}^m) \\ \kappa_{IMU} = n\pi - \arctan\left(\frac{M_{b\ 21}^m}{M_{b\ 11}^m}\right) \end{cases} \quad (27)$$

Da equação (10) obtém-se (28):

$$M_b^m = M_c^m(\omega, \varphi, \kappa) \cdot M_c^b(d\omega, d\varphi, d\kappa)^T \quad (28)$$

onde:

- M_c^b : é a matriz de rotação de um constante valor de desalinhamento angular ($d\omega, d\varphi, d\kappa$) representados na equação (29);

$$M_c^b = \begin{bmatrix} \cos(d\kappa) & \sin(d\kappa) & 0 \\ -\sin(d\kappa) & \cos(d\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(d\varphi) & 0 & -\sin(d\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(d\varphi) & 0 & \cos(d\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(d\omega) & \sin(d\omega) \\ 0 & -\sin(d\omega) & \cos(d\omega) \end{bmatrix} \quad (29)$$

- M_c^m : é a matriz de rotação dos ângulos de orientação da câmera derivados da calibração *in situ* no referencial geodésico;
- M_b^m : é a matriz de rotação dos ângulos de orientação derivados do sistema inercial no referencial geodésico.

Analogamente à seção anterior, o primeiro cenário considerou um único valor de $(d\omega, d\varphi, dk)$ para todo o sub-bloco, enquanto no segundo cenário foram considerados os valores $(d\omega_1, d\varphi_1, dk_1)$ para direção NE e $(d\omega_2, d\varphi_2, dk_2)$ para SO. Através da expansão de Taylor para linearização das três equações (30), têm-se:

$$\begin{cases} V_{\omega_{IMU}} = F_{\omega_{IMU_0}} + \frac{\partial F_{\omega_{IMU_0}}}{\partial d\omega} \Delta d\omega + \frac{\partial F_{\omega_{IMU_0}}}{\partial d\varphi} \Delta d\varphi + \frac{\partial F_{\omega_{IMU_0}}}{\partial dk} \Delta dk \\ V_{\varphi_{IMU}} = F_{\varphi_{IMU_0}} + \frac{\partial F_{\varphi_{IMU_0}}}{\partial d\omega} \Delta d\omega + \frac{\partial F_{\varphi_{IMU_0}}}{\partial d\varphi} \Delta d\varphi + \frac{\partial F_{\varphi_{IMU_0}}}{\partial dk} \Delta dk \\ V_{k_{IMU}} = F_{k_{IMU_0}} + \frac{\partial F_{k_{IMU_0}}}{\partial d\omega} \Delta d\omega + \frac{\partial F_{k_{IMU_0}}}{\partial d\varphi} \Delta d\varphi + \frac{\partial F_{k_{IMU_0}}}{\partial dk} \Delta dk \end{cases} \quad (30)$$

Onde:

- $F_{\omega_{IMU_0}}, F_{\varphi_{IMU_0}}, F_{k_{IMU_0}}$ são os valores iniciais da expansão de Taylor;
- Os termos restantes correspondem às derivadas de primeira ordem de $(d\omega, d\varphi, dk)$ para o primeiro cenário e $(d\omega_1, d\varphi_1, dk_1, d\omega_2, d\varphi_2, dk_2)$ para o segundo.

A solução é obtida através de um ajustamento MMQ, em que a cada iteração do processo, as correções do desalinhamento angular são reintroduzidas nas equações (30). O processo é interrompido quando as diferenças do desalinhamento angular da atual iteração com os obtidos pela iteração anterior forem inferiores a um certo limiar. O valor limiar usado foi o mais restritivo possível, igual a 0,002 arcos de grau.

3.3.7 Avaliação dos Desalinhamentos Angulares Determinados nos Espaços Imagem e Objeto

Nesta etapa foram avaliados os valores obtidos na determinação dos *boresight angles*, através da interseção fotogramétrica com o georreferenciamento direto, nos 41 LCPs de verificação em estereopares fotogramétricos. A avaliação se dividiu em diferentes experimentos com e sem correção dos *boresight angles* determinados pela metodologia proposta e pelo método a dois passos, utilizando os POIs *in situ* e de fábrica.

No espaço imagem, são avaliados os REQM das paralaxes residuais y dos 41 LCPs de verificação localizados em estereopares fotogramétricos ao longo de todo o bloco. Além disso, é mostrado o percentual das paralaxes residuais acima de 10 μm (aproximadamente 1,5 o tamanho pixel). Este valor foi escolhido por se tratar de um limite tolerável para realização da restituição estereofotogramétrica, conforme discutido em (HEIPKE, JACOBSEN e WEGMANN, 2002).

No espaço objeto, as coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação são comparadas com as coordenadas de referência determinadas pelas interseções dos planos. Assim, é analisado o REQM das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação. Como a exatidão posicional planimétrica para os LCPs pode variar entre 0,1 a 1,0 m (VOSSSELMAN e MAAS, 2010), foi adotado o valor da exatidão posicional do REQM das discrepâncias (X, Y) igual a 40 cm (duas vezes o desvio padrão do equipamento). Para a exatidão altimétrica do REQM das discrepâncias em Z (dz), adotou-se o valor de 48 cm baseado na equação (31) descrita em (ALAMÚS e WOLFGANG, 2008), que considera o valor médio da altura de voo (1.600 m), o valor médio da linha de base (452 m), o tamanho do pixel (0,006 mm) e a distância focal aproximada (100,4 mm).

$$d_z = \sqrt{2} \cdot \frac{H^2}{B \cdot f} \cdot \sigma_i \quad (31)$$

onde:

H = altitude de voo; B = aerobase; f = distância focal; σ_i = tamanho do pixel no espaço imagem.

Complementarmente, foi realizada uma avaliação estatística das discrepâncias planialtimétricas resultantes dos 41 LCPs de verificação. Dois testes estatísticos foram realizados no aplicativo R. O primeiro verificou a normalidade dos dados através do teste de *Shapiro-Wilk* ($\alpha=0,05$). Assim, tendo uma distribuição normal para os dados, o teste *t* de *Student* foi realizado para verificação da existência de tendências nas discrepâncias. As seguintes hipóteses foram confrontadas, conforme a equação (32):

$$\begin{aligned} H_0: \mu &= \mu_0 \\ H_1: \mu &\neq \mu_0 \end{aligned} \quad (32)$$

Considerando $\mu_0=0$, a hipótese nula (H_0) parte da premissa que a média populacional estimada (μ) é igual a zero. Por outro lado, a hipótese alternativa H_1 pressupõe que a média populacional estimada é diferente de μ_0 . Os valores das médias populacionais foram calculados a partir das amostras para as componentes

X, Y e Z. Para comprovar a aceitação ou rejeição de H_o , calculou-se a estatística amostral t_{calc} baseada na média amostral (\bar{x}), no desvio padrão amostral (S), no tamanho da amostra (n), conforme a equação (33) .

$$t_{calc} = \frac{(\bar{x} - \mu_0)}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (33)$$

A hipótese nula será aceita ao nível de significância α , se o valor absoluto da estatística amostral calculada (t_{calc}) for menor que o valor de t tabelado ($t_{\alpha/2, n-1}$), dado pela equação .

$$|t_{calc}| < t_{(\alpha/2, n-1)} \quad (34)$$

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

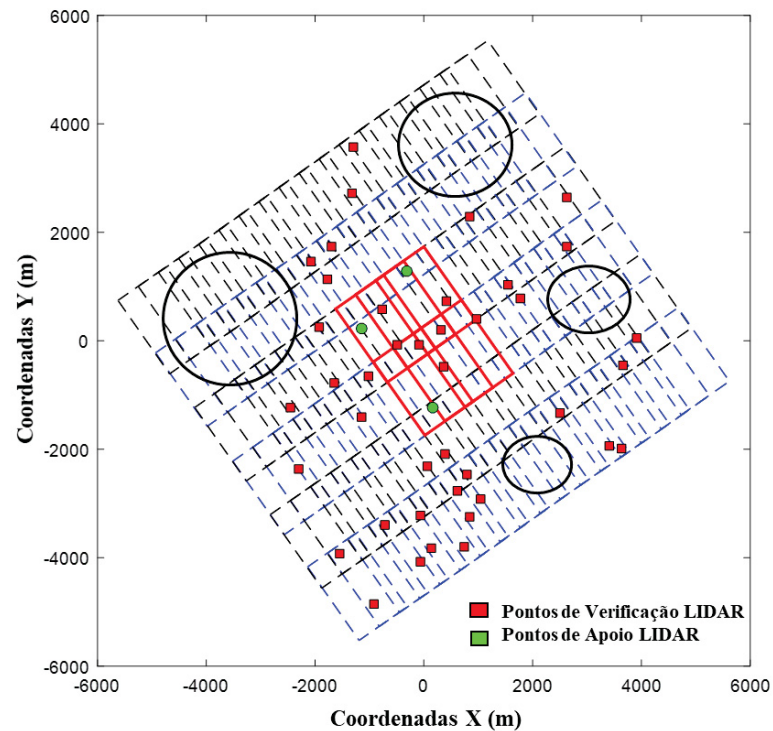
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo é apresentada a análise dos resultados obtidos pela metodologia proposta para integração dos dados fotogramétricos e LIDAR. No item 4.2 são discutidos os resultados da primeira etapa da metodologia, referente a extração dos pontos controle e verificação na nuvem LIDAR (LCPs). O item 4.3 apresenta os resultados da calibração *in situ* da câmera com uma análise da qualidade dos POI obtidos, dos POE e dos pontos LCPs. No item 4.4 é discutida a estratégia de obtenção das coordenadas tridimensionais com o uso das equações de colinearidade inversa, juntamente com o MDT LIDAR. O item 4.5 apresenta os resultados da determinação do desalinhamento angular (*boresight angles*) pela equação de colinearidade direta. Trata-se do item com a principal contribuição da metodologia proposta. No item 4.6 é analisada a qualidade dos *boresight angles* obtidos pela metodologia proposta, comparando-os com os *boresight angles* calculados pelo método a dois passos. Além disso, é realizada uma avaliação da qualidade da interseção fotogramétrica com georreferenciamento direto nos espaços imagem e objeto em diferentes cenários com e sem a presença dos *boresight angles* em diferentes experimentos com POIs de fábrica e *in situ*.

4.2 EXTRAÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE LIDAR (LCPS)

Quarenta e quatro LCPs foram determinados na nuvem LIDAR através do método proposto a partir da intersecção de planos. Três LCPs foram aplicados como pontos de controle para a calibração *in situ* da câmera. Os demais pontos foram utilizados como pontos de avaliação da exatidão da integração dos dados fotogramétricos e LIDAR pela metodologia proposta no estudo. A distribuição dos pontos de verificação não foi regular devido a área ser rural com limitadas edificações. A FIGURA 23 ilustra a distribuição dos pontos LCPs de controle e verificação extraídos, bem como as regiões com ausência de edificações na área de estudo (círculos).

FIGURA 23 – DISTRIBUIÇÃO DOS LCPs EXTRAÍDOS



FONTE: O autor (2018).

O método desenvolvido requer, preferencialmente, alta densidade de pontos da nuvem LIDAR sobre as regiões edificadas. Além disso, a superfície dos telhados deve ser suave para uma melhor obtenção dos planos durante o ajustamento pelo método proposto. Contudo, o método também pode ser aplicado em condições adversas às descritas, onde vai requerer mais iterações para a convergência.

No estudo realizado, os quarenta e quatro LCPs foram extraídos de uma nuvem de pontos com densidade média de aproximadamente 5 pontos/m². As exatidões dos LCPs foram medidas utilizando a matriz variância-covariância das interseções dos planos. O REQM dos desvios-padrões das coordenadas (X, Y, Z) dos LCPs foram, respectivamente, 43,4 cm, 41,6 cm e 11,8 cm. Considerando o desvio padrão nominal do equipamento LASER scanner ALS60 (20 cm para a planimetria e 15 cm para a altimetria), o REQM planimétrico dos LCPs obtidos se encontram aproximadamente nos 2 σ e o REQM altimétrico inferior a σ .

4.3 CALIBRAÇÃO *IN SITU* DE CÂMERA UTILIZANDO SUB-BLOCO

A calibração *in situ* da câmera utilizou as seguintes precisões: 0,003 mm (meio-pixel) para as fotocoordenadas; 20 cm para as coordenadas (X, Y) e 15 cm para a componente Z dos LCPs. Para os POE oriundos do GNSS/INS, utilizou-se a precisão nominal do Applanix GNSS/INS POS AV 310: 54 arcseg para (ω , ϕ) e 126 arcseg para (κ), considerando os resultados de pós-processamento da trajetória.

O programa de calibração da UFPR (CALBRAV) foi utilizado para realizar a calibração *in situ* da câmera. Através da matriz variância e covariância, um parâmetro foi considerado significativo quando seu desvio padrão era dez vezes menor que a magnitude do seu valor.

A TABELA 2 apresenta os resultados obtidos na calibração *in situ* da câmera. A raiz do erro quadrático médio (REQM) dos resíduos foram utilizados para a verificação dos resultados. O REQM dos resíduos das fotocoordenadas são menores que a precisões *a priori* (0,003 mm). O REQM dos resíduos das coordenadas (X_s , Y_s , Z_s) da posição dos CP, obtidas diretamente pelo GNSS/INS e dos pontos LCPs (X, Y, Z) obtidos com as interseções dos planos são menores que as precisões adotadas *a priori*, variando entre 2,0 a 8,2 cm. O REQM dos resíduos das orientações dos CP (ω , ϕ , κ), obtidas diretamente pelo GNSS/INS, variaram de 21,6 a 158,4 arcseg. Como pode ser observado, somente a componente *kappa* foi um pouco maior que a precisão *a priori* (cerca de 32 arcseg). Isto implica a presença de um desalinhamento angular mais acentuado na componente *kappa*. Contudo, os resultados obtidos são aceitáveis, pois, a determinação dos *boresight angles* será feita na seção 4.5.

TABELA 2 - RESULTADOS DOS RESÍDUOS DA CALIBRAÇÃO *IN SITU*

Resíduos das fotocoordenadas (μm)		Resíduos dos pontos de controle LIDAR (cm)			Resíduos das coordenadas os CPs (cm)			Resíduos das orientações dos CPs (arcseg)		
REQM em x/y		REQM em X/Y/Z			REQM em $X_s/Y_s/Z_s$			REQM em $\omega / \phi / \kappa$		
2,0	2,0	8,7	6,1	0,6	2,0	2,6	8,2	21,6	32,4	158,4

FONTE: O autor (2018).

Os valores dos POI obtidos na calibração *in situ* são apresentados na TABELA 3. Somente os valores da distância focal e a coordenada “ x_0 ” do ponto principal foram

significativos de acordo com a matriz variância-covariância derivada do processo de calibração. Os demais parâmetros (K_1 , K_2 , K_3 , P_1 , P_2 , b_1 e b_2) não foram considerados significativos na calibração.

TABELA 3 - POI ESTIMADOS PELA CALIBRAÇÃO *IN SITU* DA CÂMERA

POI	Valores
f (mm)	100,350
σ_f (mm)	0,017
x_o (mm)	-0,133
σ_{x_o} (mm)	0,007
y_o (mm)	0,000
σ_{y_o} (mm)	0,000

FONTE: O autor (2018).

A TABELA 4 apresenta a correlação média absoluta existente entre os POI (x_o , y_o , f) da câmera e os POE (X_o , Y_o , Z_o , ω , φ , κ) do sub-bloco de imagens. Da análise dos resultados, observa-se uma baixa correlação entre os parâmetros devido a fixação dos POE na etapa de ajustamento. Este resultado indica que a calibração dos POI foi adequada. A máxima correlação encontrada foi de aproximadamente 47% entre x_o e φ .

TABELA 4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO MÉDIA ENTRE POI E POE

Matriz de Correlação Média Absoluta (%)			
POE/POI	f	x_o	y_o
ω	25,2	41,8	0,2
φ	8,3	47,1	0,2
κ	14,4	28,2	0
X_o	2,4	11,3	0
Y_o	3,6	8,2	0
Z_o	10	15,5	0

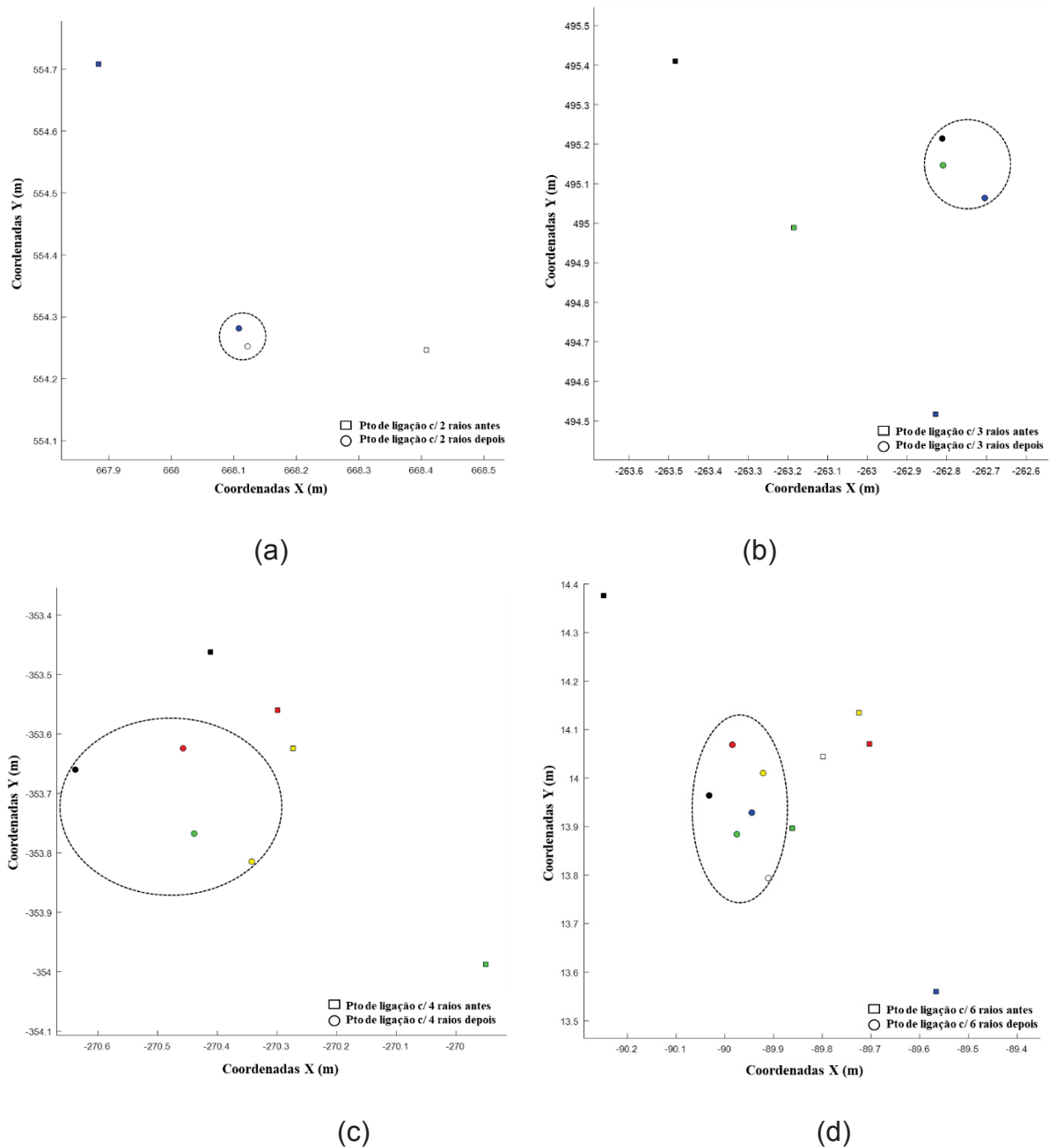
FONTE: O autor (2018).

4.4 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS 3D PELA EQUAÇÃO DE COLINEARIDADE INVERSA

Esta etapa da metodologia objetivou a determinação das coordenadas 3D dos pontos fotogramétricos a partir das equações de colinearidade inversa e do MDT LIDAR. As coordenadas tridimensionais dos pontos fotogramétricos foram utilizadas como pontos de apoio para a determinação do desalinhamento angular entre a IMU e câmera na seção a seguir.

O procedimento de determinação das coordenadas 3D dos pontos fotogramétricos se baseia em um processo iterativo, a partir das equações de colinearidade inversa, usando os POI determinados na seção anterior, os POE oriundos do georreferenciamento direto (GNSS/INS) e o MDT LIDAR. Na primeira iteração, o valor médio das coordenadas Z foi 851,264 m e para os ($d\omega$, $d\phi$, $d\kappa$) foram zero. Estes valores foram atualizados nas próximas iterações para refinar as coordenadas (X, Y, Z) dos pontos fotogramétricos. Após três iterações, as distâncias planimétricas dos raios projetados no MDT LIDAR foram reduzidas significativamente. A FIGURA 24 mostra a convergência de pontos fotogramétricos com dois, três, quatro e seis raios antes e depois (linhas pontilhadas) dos refinamentos. FIGURA 24 (a) mostra um ponto com dois raios, onde a distância foi reduzida de 67 para 5 cm. Na FIGURA 24 (b), a maior distância de um ponto de três raios foi reduzida de 1,14 m para 22 cm. A FIGURA 24 (c) apresenta a redução de cerca de 32 cm de um outro ponto com quatro raios. E na FIGURA 24 (d), a máxima distância de um ponto com 6 raios foi reduzida de 1,10 m para 31 cm. Assim, conclui-se que aplicação das correções dos *boresight angles* implicou na diminuição dos erros de paralaxe nas direções x e y para os pontos com 2, 3, 4 e 6 raios.

FIGURA 24 – RESULTADOS DAS INTERSEÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS MÚLTIPLOS RAIOS



FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: (a) 02 RAIOS, (b) 03 RAIOS, (c) 04 RAIOS e (d) 06 RAIOS.

A TABELA 5 mostra os valores dos elementos usados para o cálculo das coordenadas (C, L) das células bidimensionais. O número de pontos do MDT LIDAR da região do sub-bloco foi de 3.756.783. A divisão do MDT em aproximadamente 61 células bidimensionais, com um quantitativo de no máximo 1.000 pontos, possibilitou a diminuição do esforço computacional em aproximadamente 10 vezes durante a varredura da nuvem.

TABELA 5 - VALORES DOS ELEMENTOS USADOS PARA CÁLCULO DE (C, L)

E_{Min} (m)	E_{Max} (m)	N_{Min} (m)	N_{Max} (m)	dE (m)	dN (m)	$K_x=K_y$	Δ_x (m)	Δ_y (m)
402120	404819,99	7540440	7542839,99	0,00040	0,00075	61,29	44,05	39,16

FONTE: O autor (2018).

Como resultados desta etapa, as coordenadas dos pontos fotogramétricos (X_i , Y_i , Z_i) para cada imagem ($i=1, 2, 3, \dots, 6$) projetadas no MDT LIDAR serão usadas na próxima seção.

4.5 DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ANGULAR PELA METODOLOGIA PROPOSTA E DE REFERÊNCIA

A determinação do desalinhamento angular pela metodologia proposta trata-se da principal contribuição da pesquisa, pois visa a integração de dados fotogramétricos e LIDAR, sem pontos de apoio, com o uso do MDT da região. O método está baseado em um processo iterativo, onde as coordenadas dos VLCPs, obtidas na seção anterior, são inseridas nas equações de colinearidade direta para cálculo dos ângulos do desalinhamento angular. Como discutido antes, um ponto VLCP é a média dos valores das coordenadas (X , Y , Z) de todos os raios observados por ponto fotogramétrico projetado no MDT LIDAR. Adicionalmente, foi realizada a determinação do desalinhamento angular pelo método a dois passos para comparação dos resultados.

4.5.1 DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ANGULAR PELA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia para cálculo do desalinhamento angular considerou dois cenários. O primeiro cenário da calibração do desalinhamento angular considerou um único valor de desalinhamento angular ($d\omega$, $d\phi$, dk) para todo o sub-bloco. O processamento foi concluído em três iterações, obtendo-se 3,13 arcseg como valor de correção final do desalinhamento angular, portanto abaixo do valor limiar *a priori* definido (18 arcseg). Os desvios-padrões de ($d\omega$, $d\phi$, dk) foram obtidos a partir da matriz variância-covariância. A TABELA 6 mostra o valor do desalinhamento angular

calculado após a determinação pelo método proposto. Como pode ser visto, os valores absolutos de $d\omega$, $d\phi$ e dk são inferiores às imprecisões da IMU (18 arcseg). Além disso, os valores absolutos das componentes $d\omega$ e $d\phi$ são menores que seus respectivos desvios-padrões. Assim, pode se concluir que a modelagem de um valor único de $(d\omega, d\phi, dk)$ para todo sub-bloco não possibilitou a determinação de *boresight angles* significativos.

TABELA 6 - RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO USANDO UM ÚNICO VALOR DE DESEALINHAMENTO ANGULAR PARA TODO SUB-BLOCO

Constante desalinhamento angular	Direções Nordeste e Sudoeste (arcseg)	Desvios-padrões (arcseg)
$d\omega$	1,254	2,292
$d\phi$	-1,748	2,343
dk	-16,657	6,305

FONTE: O autor (2018).

As causas da insignificância dos valores $(d\omega, d\phi, dk)$ não foram objeto de estudo nesta pesquisa. Contudo, podem estar relacionadas a algum pré-processamento da atitude do sistema inercial conduzido pela empresa de aerolevantamento. Ou ainda, a calibração dos *boresight angles* pode ter sido influenciada pela baixa sobreposição longitudinal/lateral entre as imagens do bloco fotogramétrico.

O segundo cenário de calibração considerou valores de *boresight angles* para cada sentido de voo: $(d\omega_1, d\phi_1, dk_1)$ para direção NE e $(d\omega_2, d\phi_2, dk_2)$ para SO. Neste caso, o processo convergiu após três iterações com o valor de correção angular igual a 7,699 arcseg, portanto, menor que o valor *a priori* adotado (18 arcseg). A TABELA 7 apresenta os valores dos desalinhamentos angulares para as faixas com sentidos de voo NE e SO obtidos pela metodologia proposta. Diferentemente do primeiro cenário, os *boresight angles* apresentaram, em sua maioria, valores superiores a 18 arcseg. Os valores absolutos dos *boresight angles* na faixa de voo NE (32,952; -48,505; -215,475) foram maiores que os valores na faixa de voo SO (-1,218; 5,838; 61,433). A componente do desalinhamento angular $d\omega_2$ teve seu desvio-padrão um pouco maior que seu valor absoluto. Por outro lado, a componente dk_2 apresentou valor superior a 1 arcmin. Assim, conclui-se que o segundo cenário de calibração está mais adequado para a determinação dos *boresight angles*.

TABELA 7 - RESULTADOS DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO PROPOSTO USANDO VALORES PARA CADA SENTIDO DE VOO PARA O SUB-BLOCO

Desalinhamento angular	Direção Nordeste (arcseg)	Desvio-padrão (arcseg)	Direção Sudoeste (arcseg)	Desvio-padrão (arcseg)
$d\omega$	32,952	1,373	-1,218	1,352
$d\phi$	-48,505	1,438	5,838	1,444
dk	-215,475	4,044	61,433	3,979

FONTE: O autor (2018).

4.5.2 DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ANGULAR PELO MÉTODO A DOIS PASSOS

Analogamente à seção anterior, dois cenários de calibração dos *boresight angles* foram considerados na modelagem a dois passos, visando a comparação com os resultados obtidos pelo método proposto. O primeiro cenário considerou um único valor de ($d\omega$, $d\phi$, dk) para todo o sub-bloco. Os resultados podem ser vistos na TABELA 8. De maneira similar aos resultados do método proposto, os desvios-padrões de ($d\omega$, $d\phi$) são maiores que seus valores absolutos no método a dois passos.

TABELA 8 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO A DOIS PASSOS DOS *BORESIGHT ANGLES* USANDO ÚNICO VALOR PARA O SUB-BLOCO

Constante desalinhamento angular	Direções Nordeste e Sudoeste (arcseg)	Desvios-padrões (arcseg)
$d\omega$	3,109	39,116
$d\phi$	-21,050	39,116
dk	-59,847	39,116

FONTE: O autor (2018).

O segundo cenário para calibração do desalinhamento angular determinou os valores dos *boresight angles* para cada direção de voo: ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) para direção Nordeste e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) para direção Sudoeste. A TABELA 9 apresenta os resultados obtidos pela calibração a dois passos dos *boresight angles* para cada direção de voo. Como pode ser visto, somente a componente $d\phi_2$ apresentou desvio-padrão maior que seu valor.

TABELA 9 - RESULTADOS DO MÉTODO A DOIS PASSOS DE CALIBRAÇÃO USANDO VALORES PARA CADA SENTIDO DE VOO DO SUB-BLOCO

Desalinhamento angular	Direção Nordeste (arcseg)	Desvio-padrão (arcseg)	Direção Sudoeste (arcseg)	Desvio-padrão (arcseg)
$d\omega$	22,437	5,363	-15,314	9,013
$d\phi$	-42,761	5,363	0,756	9,013
dk	-206,090	5,363	87,873	9,013

FONTE: O autor (2018).

4.5.3 DETERMINAÇÃO DO DESALINHAMENTO ANGULAR PELA METODOLOGIA PROPOSTA COM POI DE FÁBRICA

Complementarmente, um experimento adicional foi realizado utilizando os POI de fábrica. Este experimento investigou a aplicação do método proposto sem o uso dos POI da calibração da câmera *in situ*. A modelagem considerou valores de *boresight angles* para cada sentido de voo: ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) para direção NE e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) para SO. O processo convergiu após três iterações com limiar de 27,50 arcseg, aproximadamente 10 arcseg superior ao limiar *a priori* adotado (18 arcseg). A

TABELA 10 apresenta os valores dos desalinhamentos angulares para cada sentido de voo com seus respectivos desvios padrões.

Pode se observar que, comparativamente aos valores obtidos com os POI *in situ*, há diferenças nos valores dos *boresight angles*. Tais diferenças estão relacionadas as correlações entre os POE e POI, que mesmo pequenas, modificaram os valores de ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) para direção NE e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) para SO.

TABELA 10 - RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO USANDO VALORES PARA CADA SENTIDO DE VOO DO SUB-BLOCO COM POI DE FÁBRICA

Desalinhamento angular	Direção Nordeste (arcseg)	Desvio-padrão (arcseg)	Direção Sudoeste (arcseg)	Desvio-padrão (arcseg)
$d\omega$	-31,452	3,119	63,066	3,071
$d\phi$	-73,222	3,269	30,295	3,280
dk	-230,880	9,191	47,351	9,044

FONTE: O autor (2018).

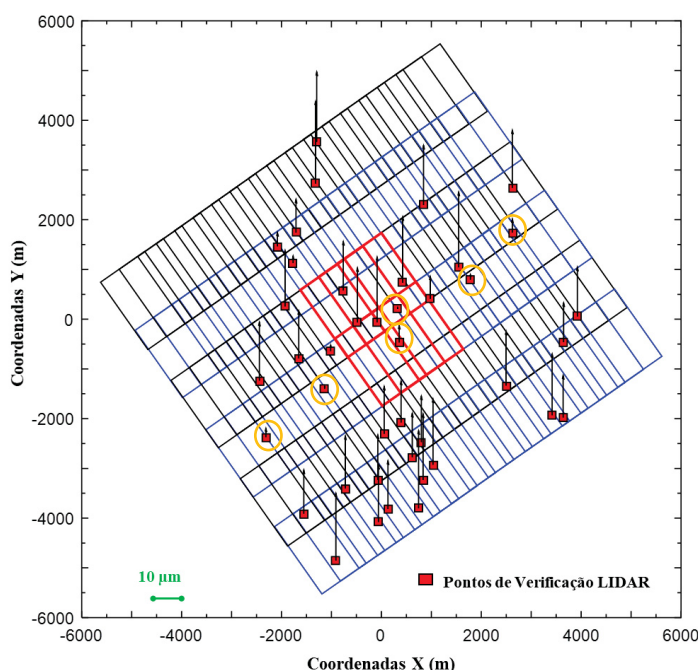
4.6 AVALIAÇÃO DOS DESALINHAMENTOS ANGULARES DETERMINADOS NOS ESPAÇOS IMAGEM E OBJETO

Esta etapa objetivou a avaliação da calibração dos *boresight angles*, na interseção fotogramétrica com o georreferenciamento direto, nos 41 LCPs de verificação em estereopares fotogramétricos. Os experimentos se dividiram em diferentes cenários e as análises foram feitas nos espaços imagem e objeto. No espaço imagem, foram avaliadas as paralaxes residuais y ao longo do bloco fotogramétrico. Para o espaço objeto, foram analisados os REQM das discrepâncias das coordenadas 3D dos 41 LCPs de verificação nos estereopares fotogramétricos.

4.6.1 EXPERIMENTO COM POI *IN SITU* E COM *BORESIGHT ANGLES* PARA TODO O BLOCO

O primeiro experimento (DG) consistiu na interseção fotogramétrica com georreferenciamento direto, sem a correção dos *boresight angles* e utilizou os POI da calibração da câmera *in situ*. Os espaços imagem e objeto dos 41 LCPs de verificação foram analisados ao longo de todo o bloco fotogramétrico.

Para o espaço imagem, a FIGURA 25 ilustra as paralaxes y residuais dos 41 LCPs de verificação. O REQM dos resíduos das paralaxes y foi igual a 21 μm e valor máximo de paralaxe igual a 35 μm . Como pode ser observado, a maioria dos pontos de verificação apresentou paralaxe residual acima de 10 μm . Contudo, os pontos destacados nos círculos, que estão contidos em uma mesma faixa, apresentaram valores inferiores a 5 μm . Este fato pode estar relacionado a uma maior exatidão dos POE das imagens da referida faixa.

FIGURA 25 – REQM DAS PARALAXES Y NOS 41 LCPs COM POI *IN SITU*

FONTE: O autor (2018).

Para o espaço objeto, o experimento apresentou o REQM das discrepâncias dos pontos de verificação igual 58,9 cm para planimetria e 48,8 cm para altimetria. Embora o experimento tenha obtido a exatidão próxima ao limiar aceitável de 48 cm, a exatidão planimétrica próxima de 40 cm não foi alcançada.

A TABELA 11 apresenta a os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* ($\alpha=0,05$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação para o experimento DG. Como pode ser observado, as discrepâncias para as três componentes possuem uma distribuição normal.

TABELA 11 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE SHAPIRO-WILK PARA DG

X		Y		Z	
Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor
0,981	0,694	0,960	0,152	0,977	0,556

FONTE: O autor (2018).

A TABELA 12 mostra os resultados do teste de tendência *t* de *Student* ($\alpha=0,05$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação para o experimento DG. Como pode ser

observado, somente a componente X apresentou p-valor levemente abaixo de 0,05 e valor absoluto de t_{calc} maior que $t_{\alpha/2, n-1}$. Conclui-se que a componente X possui uma leve tendência.

TABELA 12 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO t DE *STUDENT* PARA DG

X			Y			Z		
p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$
0,044	-2,082	2,021	0,193	-1,320	2,021	0,182	-1,358	2,021

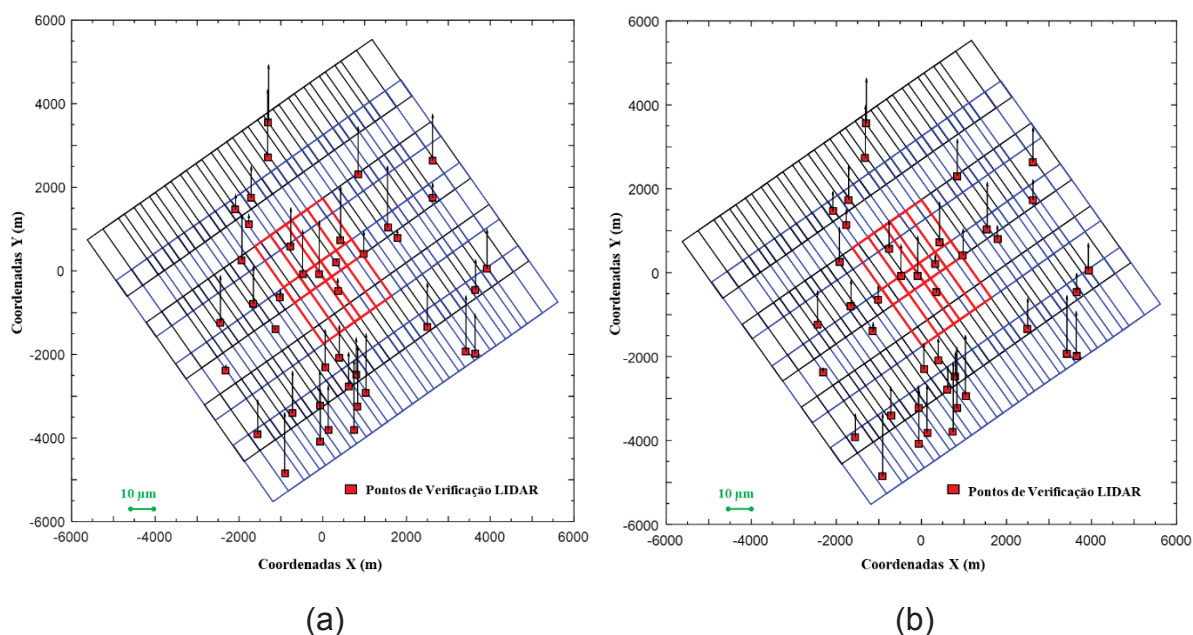
FONTE: O autor (2018).

4.6.2 EXPERIMENTOS COM POI *IN SITU* E SEM *BORESIGHT ANGLES* PARA TODO O BLOCO

Os experimentos se basearam na comparação da interseção fotogramétrica com georreferenciamento direto, com a correção dos *boresight angles* ($d\omega$, $d\phi$, dk) determinados pelo método proposto rotulado como DG_PCBA e pelo método a dois passos DG_RCBA. A avaliação da interseção fotogramétrica nestes experimentos utilizou os POI da calibração da câmera *in situ* e foi realizada nos espaços imagem e objeto dos 41 LCPs de verificação ao longo de todo o bloco fotogramétrico.

Para o espaço imagem, a FIGURA 26 mostra as paralaxes y residuais dos 41 LCPs de verificação determinados pelos dois métodos. A FIGURA 26(a) ilustra os valores residuais das paralaxes y obtidos pelo método proposto com REQM igual a 21 μm e valor máximo de paralaxe igual a 35 μm . A FIGURA 26(b) apresenta os resíduos das paralaxes y do método a dois passos, que apresentou REQM igual a 20 μm com valor máximo de paralaxe de 39 μm . Como pode ser observado, o comportamento das paralaxes residuais y ao longo do bloco fotogramétrico foi similar para os dois métodos. Assim, conclui-se que não houve diferença entre os métodos neste experimento.

FIGURA 26 – REQM DAS PARALAXES Y NOS 41 LCPs COM POI *IN SITU* E SEM VALOR ÚNICO DE *BORESIGHT ANGLES*



FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: (a) pelo método proposto e (b) pelo método a dois passos.

Para o espaço objeto, o experimento rotulado como DG_PCBA apresentou o REQM das discrepâncias dos pontos de verificação igual 58,8 cm para planimetria e 48,8 cm para altimetria. O experimento DG_RCBA apresentou REQM igual a 63,9 cm para a planimetria e 48,7 cm na altimetria. Como pode ser observado os experimentos DG_PCBA e DG_RCBA são estatisticamente similares.

A TABELA 13 apresenta a os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* ($\alpha=0,05$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação para o experimento DG_PCBA. Como pode ser observado, as discrepâncias para as três componentes possuem uma distribuição normal.

TABELA 13 – RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE *SHAPIRO-WILK* PARA DG_PCBA

X		Y		Z	
Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor
0,976	0,512	0,972	0,398	0,976	0,544

FONTE: O autor (2018).

A TABELA 14 apresenta a os resultados do teste de tendência t de *Student* ($\alpha=0,05$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação para o experimento DG_PCBA. Como pode ser observado, somente a componente X apresentou p-valor abaixo de 0,05 e valor absoluto de t_{calc} maior que $t_{\alpha/2, n-1}$. Assim, a componente X possui uma leve tendência.

TABELA 14 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO t DE *STUDENT* PARA DG_PCBA

X			Y			Z		
p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$
0,033	-2,211	2,021	0,159	-1,432	2,021	0,183	-1,354	2,021

FONTE: O autor (2018).

Para o experimento sem os *boresight angles* calculados pelo método a dois passos (DG_RCBA), a TABELA 15 apresenta a os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* ($\alpha=0,05$) das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos LCPs de verificação. De maneira similar, foi observada uma distribuição normal para as discrepâncias para as três componentes.

TABELA 15 – RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE SHAPIRO-WILK PARA DG_RCBA

X		Y		Z	
Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor
0,979	0,626	0,991	0,987	0,970	0,348

FONTE: O autor (2018).

A TABELA 16 apresenta os resultados do teste de tendência t de *Student* ($\alpha=0,05$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação para o experimento DG_RCBA. Analogamente ao experimento DG_PCBA, somente a componente X apresentou p-valor abaixo de 0,05 e valor absoluto de t_{calc} maior que $t_{\alpha/2, n-1}$. Conclui-se que a componente X possui uma tendência.

TABELA 16 - RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO t DE *STUDENT* PARA DG_RCBA

X			Y			Z		
p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$
0,0001	-4,296	2,021	0,138	-1,514	2,021	0,175	-1,382	2,021

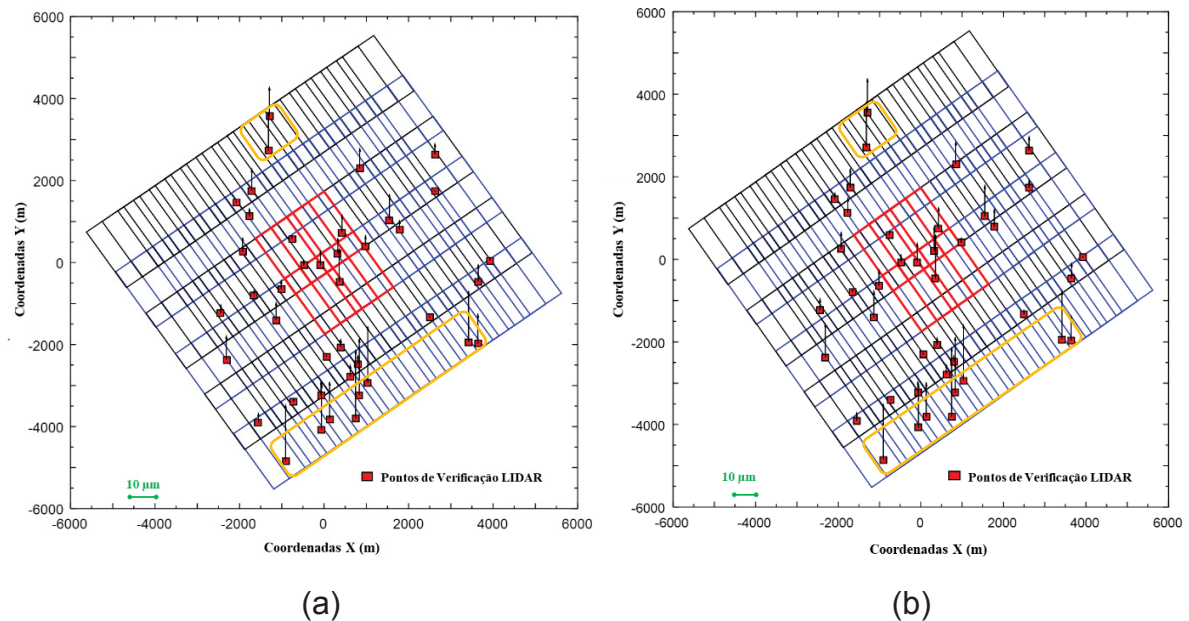
FONTE: O autor (2018).

4.6.3 EXPERIMENTOS COM POI *IN SITU* E SEM *BORESIGHT ANGLES* PARA CADA SENTIDO DE VOO

Estes experimentos se basearam na interseção fotogramétrica com georreferenciamento direto, com a correção dos *boresight angles* para cada sentido de voo: ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) para direção NE e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) para direção SO. Estes valores foram determinados pelo método proposto (rotulado como DG_PBAES) e pelo método a dois passos (rotulado como DG_RBAES). Analogamente à seção anterior, a interseção fotogramétrica com georreferenciamento direto utilizou os POI da calibração *in situ* e foi avaliada nos espaços imagem e objeto nos estereopares fotogramétricos que continham os 41 LCPs de verificação ao longo do todo o bloco fotogramétrico.

Para o espaço imagem, a FIGURA 27 apresenta as paralaxes y residuais dos 41 LCPs de verificação determinados pelos dois métodos. A FIGURA 27(a) mostra os resíduos das paralaxes y da metodologia proposta (DG_PBAES), que apresentou o REQM residual igual a 11 μm e valor máximo de paralaxe igual a 27 μm . A FIGURA 27(b) ilustra as paralaxes y residuais do método a dois passos (DG_RBAES), que resultou no REQM residual igual a 10 μm e valor máximo de paralaxe de 24 μm . Baseados nestes resultados, pode se concluir que os experimentos DG_PBAES e DG_RBAES são estatisticamente similares. Em relação aos experimentos da seção 4.6.2, o REQM das paralaxes residuais y reduziu significativamente (cerca de 50%) nos dois experimentos DG_PBAES e DG_RBAES. Além disso, a maioria dos pontos de verificação, localizados nas bordas do bloco fotogramétrico (retângulo amarelo), apresentou valores de paralaxes residuais y maiores que 15 μm . Uma das hipóteses destes resultados está relacionada ao afastamento dos pontos de verificação em relação ao sub-bloco, onde a calibração dos parâmetros de montagem foi realizada. Além disso, a geometria do bloco de imagens com limitadas sobreposições longitudinal e lateral não favorece a determinação dos parâmetros de montagem.

FIGURA 27 – REQM DAS PARALAXES Y NOS 41 LCPs COM POI *IN SITU* E SEM VALORES DE *BORESIGHT ANGLES* PARA CADA SENTIDO DE VOO



FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: (a) pelo método proposto e (b) pelo método a dois passos.

Para o espaço objeto, o experimento rotulado como DG_PBAES apresentou o REQM das discrepâncias dos pontos de verificação igual 45,1 cm para planimetria e 47,2 cm para altimetria. O experimento DG_RBAES apresentou REQM igual a 40,9 cm para a planimetria e 46,9 cm na altimetria. Como pode ser observado, os experimentos DG_PBAES e DG_RBAES são estatisticamente similares no espaço objeto.

A TABELA 17 mostra os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* ($\alpha=0,05$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação para o experimento DG_PBAES. Como pode ser observado, as discrepâncias para as três componentes possuem uma distribuição normal.

TABELA 17 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE *SHAPIRO-WILK* PARA DG_PBAES

X		Y		Z	
Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor
0,973	0,441	0,967	0,278	0,972	0,394

FONTE: O autor (2018).

A TABELA 18 apresenta a os resultados do teste de tendência t de *Student* ($\alpha=0,05$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação para o experimento DG_PBAES. Como pode ser observado, as componentes (X, Y) apresentaram p-valores abaixo de 0,05 e valores absolutos de t_{calc} maiores que $t_{\alpha/2, n-1}$. Assim, as componentes (X, Y) possuem tendência.

TABELA 18 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO t DE *STUDENT* PARA DG_PBAES

X			Y			Z		
p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\alpha/2, n-1}$
7,4063-05	-4,42	2,021	0,0002	-4,06	2,021	0,262	-1,14	2,021

FONTE: O autor (2018).

Para o experimento sem os *boresight angles* calculados pelo método a dois passos (DG_RBAES), a TABELA 19 mostra os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* ($\alpha=0,05$) das discrepâncias das coordenadas dos 41 LCPs de verificação. De maneira similar, foi observada uma distribuição normal para as discrepâncias para as três componentes.

TABELA 19 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE *SHAPIRO-WILK* PARA DG_RBAES

X		Y		Z	
Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor
0,980	0,681	0,963	0,206	0,973	0,437

FONTE: O autor (2018).

A TABELA 20 apresenta os resultados do teste de tendência t de *Student* ($\alpha=0,05$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos 41 LCPs de verificação para o experimento DG_RBAES. Como pode ser observado, a componente X apresentou p-valor abaixo de 0,05 e valor absoluto de t_{calc} maior que $t_{\alpha/2, n-1}$. Assim, a componente X possui uma tendência. Em relação ao experimento DG_PBAES, o experimento DG_RBAES não apresentou tendência na componente Y.

TABELA 20 - RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO *t* DE *STUDENT* PARA DG_RBAES

X			Y			Z		
p-valor	t _{calc}	t _{α/2, n-1}	p-valor	t _{calc}	t _{α/2, n-1}	p-valor	t _{calc}	t _{α/2, n-1}
6,811e-5	4,444	2,021	0,070	1,859	2,021	0,233	1,211	2,021

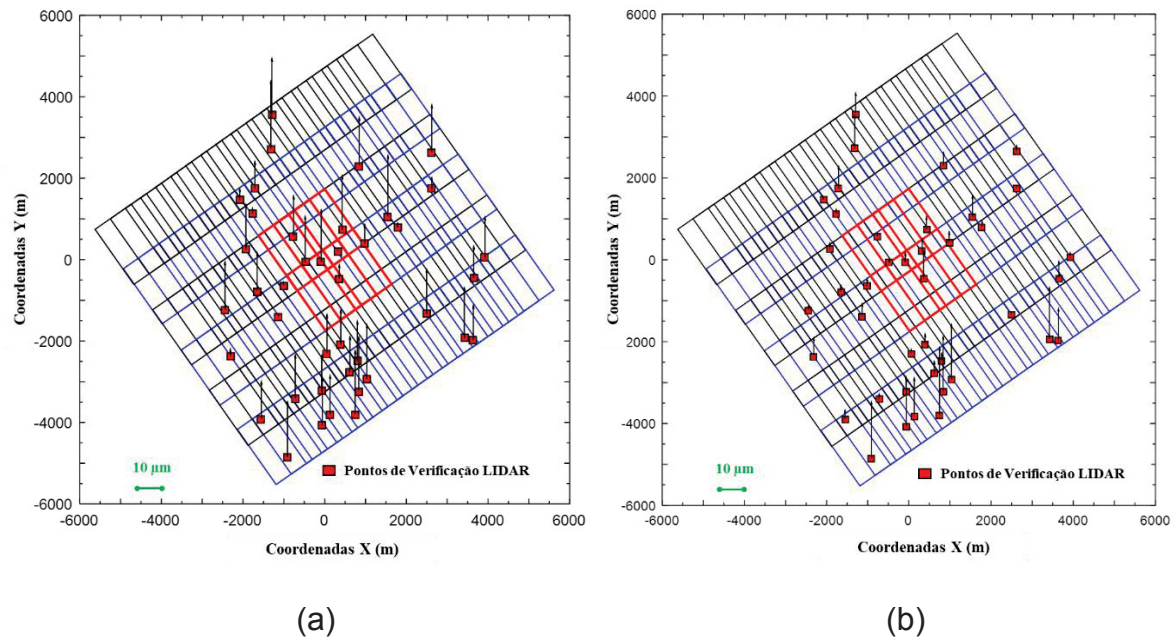
FONTE: O autor (2018).

4.6.4 EXPERIMENTOS COM POI DE FÁBRICA E VALORES DE *BORESIGHT ANGLES* PARA CADA SENTIDO DE VOO

Complementarmente aos experimentos com os POI da calibração *in situ*, dois experimentos foram realizados utilizando os POI de fábrica. Nestes experimentos foram investigados a influência dos POI de fábrica na interseção fotogramétrica com o georreferenciamento direto. No primeiro experimento, foi realizada a interseção fotogramétrica sem a correção do desalinhamento angular (DG), enquanto o segundo experimento foi executado com a correção dos *boresight angles* determinados pelo método proposto (DG_PBAES) para cada sentido de voo: ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) para direção NE e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) para a direção SO.

A FIGURA 28 ilustra as paralaxes y residuais dos 41 LCPs de verificação obtidas nos dois experimentos com os POI de fábrica. A FIGURA 28(a) apresenta o comportamento das paralaxes y no experimento com a presença do desalinhamento angular, que apresentou o REQM residual igual a 21 μm e valor máximo de paralaxe igual a 35 μm . A FIGURA 28(b) ilustra o desempenho das paralaxes y no experimento sem os *boresight angles* para cada sentido de voo, que proporcionou o REQM residual igual a 11 μm e valor máximo de paralaxe igual a 29 μm . Baseado nos resultados, pode-se concluir que mesmo com os POI de fábrica o método proposto apresentou uma redução de 10 μm no REQM das paralaxes y residuais.

FIGURA 28 - REQM DAS PARALAXES Y NOS 41 LCPs COM POI DE FÁBRICA



FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: (a) com desalinhamento angular todo bloco e (b) sem desalinhamento angular para cada sentido de voo pelo método proposto.

Para o espaço objeto, o experimento DG apresentou o REQM planimétrico igual 57,4 cm e 137,4 cm para altimetria. O experimento DG_PBAES resultou no REQM planimétrico igual a 73,2 cm e altimétrico igual a 132,5 cm. Como pode ser observado, os valores não atenderam o limiar de 40 cm para a planimetria e 48 cm para altimetria. Os resultados indicam que a existência de um deslocamento relativo (*lever-arm*) entre a IMU e a câmera não foi eliminada no experimento de calibração do desalinhamento angular (DG_PBAES).

A TABELA 21 apresenta os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* ($\alpha=0,05$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais para o experimento com a presença do desalinhamento angular. Como pode ser visto, a componente Y não se aproxima de uma distribuição normal pois o p-valor estar abaixo do limiar 0,05.

TABELA 21 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE *SHAPIRO-WILK* PARA DG

X		Y		Z	
Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor
0,986	0,878	0,939	0,028	0,974	0,455

FONTE: O autor (2018).

Os resultados do teste estatístico *t* de *Student* para as discrepâncias das componentes (X, Y, Z) pode ser visualizado na TABELA 22. É possível observar que as componentes (X, Z) apresentaram uma tendência. Uma das hipóteses que pode explicar esta tendência é erro sistemático dos POI de fábrica.

TABELA 22 - RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO *t* DE *STUDENT* PARA DG

X			Y			Z		
p-valor	t _{calc}	t _{α/2, n-1}	p-valor	t _{calc}	t _{α/2, n-1}	p-valor	t _{calc}	t _{α/2, n-1}
0,031	-2,241	2,021	0,135	-1,527	2,021	2,2e-16	17,248	2,021

FONTE: O autor (2018).

Para o experimento com POI de fábrica sem os *boresight angles* calculados pelo método proposto (DG_PBAES), a mostra os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* ($\alpha=0,05$) das discrepâncias das coordenadas dos 41 LCPs de verificação. De maneira similar ao experimento DG, foi observada que a componente Y não apresentou uma distribuição normal.

TABELA 23 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE *SHAPIRO-WILK* PARA DG_PBAES

X		Y		Z	
Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor	Valor de W	p-valor
0,977	0,575	0,933	0,018	0,971	0,372

FONTE: O autor (2018).

Os resultados do teste estatístico *t* de *Student* nas discrepâncias das componentes (X, Y, Z) pode ser visualizado na TABELA 24. É possível observar que as componentes (X, Z) continuam apresentando uma tendência. Assim, pode se concluir que o método proposto não contribuiu para a melhoria da exatidão da integração dos dados fotogramétricos e LIDAR no espaço objeto.

TABELA 24 - RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO t DE *STUDENT* PARA DG_PBAES

X			Y			Z		
p-valor	t _{calc}	t _{α/2, n-1}	p-valor	t _{calc}	t _{α/2, n-1}	p-valor	t _{calc}	t _{α/2, n-1}
0,006	-2,881	2,021	0,105	-1,659	2,021	2,2e-16	18,201	2,021

FONTE: O autor (2018).

4.6.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS

A TABELA 25 mostra o consolidado no espaço imagem dos resultados dos REQM das paralaxes residuais y considerando os diferentes experimentos, juntamente com os percentuais de LCPs de verificação com paralaxes y maiores que 10 μm . Como pode ser observado, não há diferenças entre os experimentos com desalinhamento angular (DG), que utilizaram os POI de fábrica e *in situ*. Para os dois experimentos, o percentual de LCPs de verificação com paralaxes y acima de 10 μm foi de 75,61%. Os experimentos, sem desalinhamento angular único ($d\omega$, $d\phi$, dk) pelo método proposto (DG_PCBA) e a dois passos (DG_RCBA), apresentaram percentuais de 78,05% e 82,93%, respectivamente, das paralaxes y acima de 10 μm . Conclui-se que, a determinação de único valor de desalinhamento angular ($d\omega$, $d\phi$, dk) não reduziu os valores das paralaxes residuais y. Por outro lado, os experimentos, sem desalinhamento angular para cada sentido de voo ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) pelo método proposto (DG_PBAES) e a dois passos (DG_RBAES), apresentaram percentuais de 26,83% e 29,27%, respectivamente, das paralaxes y acima de 10 μm . O experimento, sem desalinhamento angular para cada sentido de voo ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) pelo método proposto (DG_PBAES) com POI de fábrica, apresentou um percentual de 24,39% das paralaxes y acima de 10 μm . Portanto, pode se inferir que a calibração dos *boresight angles* para cada sentido de voo foi mais adequada para a orientação dos modelos fotogramétricos com os POI de fábrica e *in situ*.

TABELA 25 - REQM DAS PARALAXES Y RESIDUAIS NOS 41 LCPs EM DIFERENTES EXPERIMENTOS

Experimentos		POI <i>in situ</i> (μm)	POI de fábrica (μm)	% de modelos com RMSE > 10 μm
DG	REQM_y	21	21	75,61/75,61
	Max_y	35	35	
DG_RCBA	REQM_y	20	-	82,93
	Max_y	39		
DG_PCBA	REQM_y	21	-	78,05
	Max_y	35		
DG_PBAES	REQM_y	11	11	26,83/24,39
	Max_y	27	29	
DG_RBAES	REQM_y	10	-	29,27
	Max_y	24		

REQM_y = Raiz do erro quadrático médio das paralaxes y (microns)
Max_y = Máxima paralaxe y (microns)

FONTE: O autor (2018).

A TABELA 26 apresenta o consolidado no espaço objeto dos resultados das discrepâncias dos 41 LCPs de verificação nos diferentes experimentos. Como pode ser observado, o experimento com o desalinhamento angular (DG) e POI *in situ* apresentou o REQM planimétrico igual a 58,9 cm e 48,8 cm para o REQM altimétrico. O mesmo experimento (DG) com o POI de fábrica apresentou REQM planimétrico igual a 57,4 cm e 137,4 cm para o REQM altimétrico. Pode se concluir que a calibração dos POI contribuiu para aumentar a exatidão planialtimétrica. Os experimentos, sem desalinhamento angular único ($d\omega$, $d\phi$, dk) pelo método proposto (DG_PCBA) e a dois passos (DG_RCBA), apresentaram, respectivamente, os REQM planimétricos de 58,8 cm e 63,9 cm; e 48,8 cm e 48,7 cm de REQM altimétricos. Conclui-se que os experimentos são estatisticamente similares entre si e com o experimento DG com os POI *in situ*. Considerando o valor de 40 cm como limiar para o REQM planimétrico, os experimentos DG_PCBA e DG_RCBA foram insatisfatórios, embora a exatidão altimétrica limite (48cm) tenha sido aceita para os experimentos com os POI *in situ*.

Por outro lado, os experimentos, sem desalinhamento angular para cada sentido de voo ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) pelo método proposto (DG_PBAES) e a dois passos (DG_RBAES), apresentaram, respectivamente, os REQM planimétricos

(DH) de 45,1 cm e 40,9 cm; e 47,2 cm e 46,9 cm de REQM altimétricos (DZ). Logo, pode se concluir que os métodos DG_PBAES e DG_RBAES são estatisticamente equivalentes. A calibração dos *boresight angles* para cada sentido de voo foi mais adequada para a orientação dos modelos fotogramétricos com os POI de fábrica e *in situ*. Em comparação ao experimento DG, que utilizou os POI em *situ*, o experimento DG_PBAES apresentou uma melhora mais significativa na exatidão planimétrica de aproximadamente 14 cm.

Por fim, o experimento DG_PBAES com o POI de fábrica e sem desalinhamento angular para cada sentido de voo ($d\omega_1$, $d\phi_1$, $d\kappa_1$) e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, $d\kappa_2$), apresentou o REQM planimétrico igual a 73,2 cm e 132,5 cm para o REQM altimétrico. No geral, os resultados dos experimentos DG e DG_PBAES não atenderam os limiares de exatidão planialtimétrico. A causa disso pode estar relacionada a existência de um deslocamento relativo (*lever-arm*) entre a IMU e a câmera, que não foi eliminada durante a calibração do desalinhamento angular. Conclui-se que, somente a calibração dos *boresight angles* não permitiu a melhoria da exatidão da integração dos dados fotogramétricos e LIDAR.

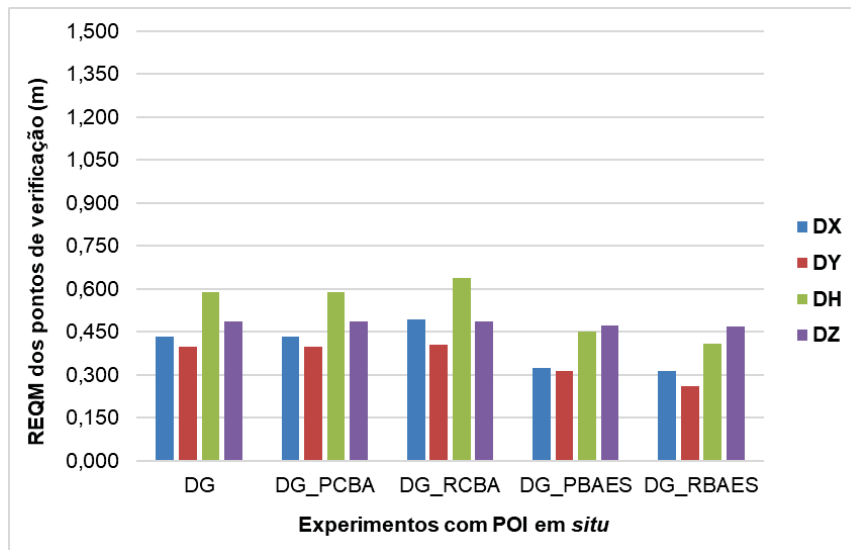
TABELA 26 - RESULTADOS DAS DISCREPÂNCIAS DOS 41 LCPs DE VERIFICAÇÃO NO ESPAÇO OBJETO

Discrepâncias dos pontos de verificação					
Experimentos		DX (cm)	DY (cm)	DH (cm)	DZ (cm)
POI <i>in situ</i>					
DG	μ	-13,6	-08,2	52,0	-10,2
	REQM	43,4	39,9	58,9	48,8
	Max	67,2	107,3	126,6	84,1
DG_PCBA	μ	-14,2	-08,8	51,9	-10,2
	REQM	43,2	40,0	58,8	48,8
	Max	62,3	102,5	126,6	83,8
DG_RCBA	μ	-27,7	-09,5	54,6	-10,4
	REQM	49,3	40,6	63,9	48,7
	Max	45,8	90,8	143,3	79,1
DG_PBAES	μ	-18,6	-17,0	39,7	-08,4
	REQM	32,4	31,4	45,1	47,2
	Max	40,1	58,8	88,3	78,3
DG_RBAES	μ	-18,1	-07,3	35,5	-08,8
	REQM	31,5	26,0	40,9	46,9
	Max	34,2	67,8	85,7	76,6
POI de fábrica					
DG	μ	-14,4	-08,8	50,3	129,0
	REQM	43,3	37,6	57,4	137,4
	Max	66,0	95,6	110,3	222,5
DG_PBAES	μ	-20,2	-13,9	69,1	125,2
	REQM	48,7	54,6	73,2	132,5
	Max	79,7	70,2	120,6	210,1
μ = Média dos valores das discrepâncias (cm); REQM = Raiz do erro quadrático médio (cm); Max = Máxima discrepância (cm); e $DH = \sqrt{DX^2 + DY^2}$ = Discrepância horizontal (cm).					

FONTE: O autor (2018).

O GRÁFICO 1 ilustra a comparação dos REQM das discrepâncias dos 41 LCPs de verificação nos diferentes experimentos. Como pode ser observado, os experimentos DG_PBAES e DG_RBAES, respectivamente, o método proposto e dois passos apresentaram os melhores resultados planialtimétricos.

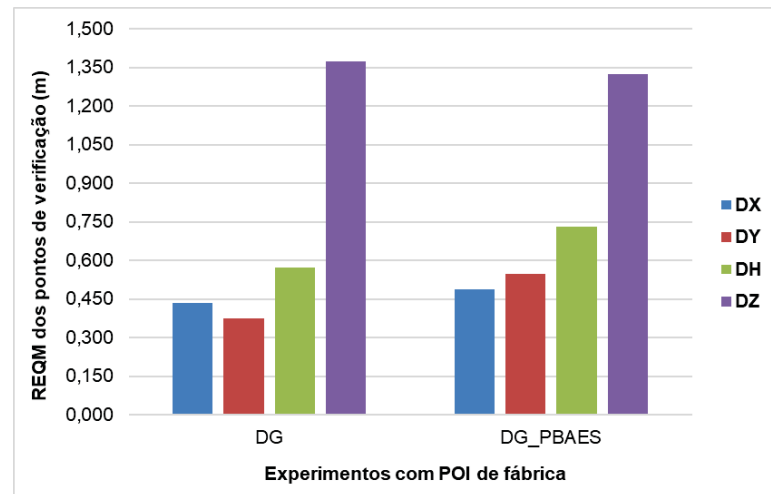
GRÁFICO 1 – REQM DAS DISCREPÂNCIAS DOS 41 LCPs DE VERIFICAÇÃO EM DIFERENTES EXPERIMENTOS COM POI *IN SITU*



FONTE: O autor (2018).

O GRÁFICO 2 apresenta a comparação dos REQM das discrepâncias dos 41 LCPs de verificação dos dois experimentos adicionais, utilizando os POI de fábrica. Diferentemente do espaço imagem, os resultados obtidos no espaço objeto com os POI de fábrica não apresentaram resultados satisfatórios. A presença de deslocamento linear relativo (*lever-arm*) entre IMU e câmera se reflete no deslocamento planialtimétrico, em especial na componente vertical que apresentou valor do REQM em torno de 1,3 m. Este resultado indica que somente a calibração dos *boresight angles* não absorveu o deslocamento linear relativo entre a IMU e Câmera. Assim, a etapa de calibração *in situ* dos POI é indispensável para a obtenção de uma exatidão posicional adequada ao projeto fotogramétrico, devido as correlações entre os POI e POE.

GRÁFICO 2 - REQM DAS DISCREPÂNCIAS DOS 41 LCPs DE VERIFICAÇÃO EM DIFERENTES EXPERIMENTOS COM POI DE FÁBRICA



FONTE: O autor (2018).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia para aumentar a exatidão da integração de dados LIDAR com fotogramétricos, a partir do georreferenciamento direto de imagens. Primeiramente, foi extraído um sub-bloco oriundo do bloco fotogramétrico para realizar a calibração dos POI da câmera nas condições de voo. A localização do sub-bloco foi baseada em um experimento para identificação da sub-região cujos POI fossem mais representativos para todo o bloco. Assim, o sub-bloco localizado na região central foi escolhido para calibração *in situ* da câmera. Em seguida, foi realizada a extração de pontos de controle LIDAR (LCPs), que incluíram também os de verificação, a partir da interseção de três planos das águas dos telhados.

Na sequência, foi realizada a calibração *in situ* da câmera para obtenção dos POI nas condições de voo. Em seguida, desenvolveu-se um método para a calibração em voo do desalinhamento angular entre a câmera e IMU, utilizando o MDT extraído da nuvem de pontos LIDAR. Dois cenários para calibração do desalinhamento angular foram considerados na modelagem proposta. No primeiro cenário, um valor constante de *boresight angles* ($d\omega$, $d\phi$, dk) foi parametrizado no ajustamento para todo o sub-bloco. No segundo, dois valores constantes de *boresight angles*: ($d\omega_1$, $d\phi_1$, dk_1) para direção NE e ($d\omega_2$, $d\phi_2$, dk_2) para SO foram considerados. Os valores do desalinhamento angular obtidos são comparados aos calculados pelo método de calibração a dois passos.

A avaliação geral da qualidade da integração dos dados fotogramétricos e LIDAR com o georreferenciamento direto foi feita utilizando LCPs de verificação obtidos pela interseção de planos. Assim, foram comparadas as coordenadas tridimensionais obtidas pela interseção fotogramétrica com as coordenadas dos LCPs nos espaços imagem e objeto. No espaço objeto, diferentes cenários foram avaliados com e sem correção dos *boresight angles* (pelo método proposto e a dois passos), utilizando os POIs *in situ* e de fábrica. Baseado nos resultados obtidos, as principais conclusões são:

- a) Os resíduos das fotocoordenadas; dos pontos de controle; das posições e orientações dos CPs apresentados na calibração *in situ* da câmera, utilizando um sub-bloco localizado na região central, mostraram que foi possível modelar os afastamentos da condição de colinearidade nas condições de voo.

- b) As correlações entre os parâmetros de orientação interior e os parâmetros de orientação exterior observados na calibração *in situ* da câmera, utilizando um sub-bloco com três LCPs, evidenciaram a viabilidade do processo de calibração da câmera.
- c) Os POI determinados pela calibração *in situ* da câmera no sub-bloco, localizado na região central, modelaram os desvios da condição de colinearidade nos experimentos com georreferenciamento direto em todo o bloco nas condições de voo.
- d) As coordenadas tridimensionais dos VLCPs determinadas, a partir das equações de colinearidade na forma inversa e MDT LIDAR, permitiram o cálculo dos *boresight angles* obtidos nas equações de colinearidade na forma direta. Assim, a metodologia proposta não requereu pontos de controle em campos de calibração.
- e) O resultado da REQM das paralaxes y residuais não foi compatível nos experimentos com a correção de um valor único de *boresight angles* para todo o bloco. Por outro lado, os experimentos com a correção dos *boresight angles* para cada sentido de voo (NE e SO) obtiveram resultados compatíveis com os valores adotados como exatidões toleráveis. A REQM das paralaxes y residuais obtidas pelo método proposto na pesquisa foi ligeiramente melhor que a REQM do método a dois passos.
- f) As REQM das discrepâncias planialtimétricas dos 41 LCPs de verificação, obtidos pelo método proposto na pesquisa, são praticamente os mesmos do método a dois passos. Além disso, o teste de normalidade provou que as discrepâncias das componentes (X, Y, Z) apresentaram uma distribuição normal. Contudo, o teste de *t* de *Student* mostrou tendência nas componentes (X, Y) das discrepâncias planialtimétricas, devido a erros sistemáticos inerentes aos sistemas sensores.
- g) Os resultados obtidos nos diferentes experimentos confirmaram que a metodologia proposta melhorou as exatidões planialtimétricas com georreferenciamento direto. Contudo, a maioria dos pontos localizados nas bordas do bloco fotogramétrico apresentou paralaxes y residuais acima de 15 μm . Tal fato pode estar relacionado ao afastamento dos pontos em relação ao sub-bloco, localizado na região central, utilizado para calibração *in situ* da

câmera. Assim, esses pontos não são adequados para a restituição fotogramétrica.

- h) Os experimentos adicionais do método proposto, com o uso dos POI de fábrica para cálculo dos *boresight angles*, mostraram que a REQM da paralaxe y residual foi reduzida no espaço imagem. Por outro lado, no espaço objeto, a REQM das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação apresentou resultado superior à REQM da calibração dos *boresight angles* que utilizou os POI *in situ*. Isto sugere que somente a calibração dos *boresight angles* não absorve o deslocamento posicional relativo entre IMU-Câmera.

Por fim, conclui-se que a metodologia proposta é relevante para um contexto de mapeamento fotogramétrico integrado com LIDAR.

Como recomendações para futuras pesquisas são sugeridos os seguintes tópicos:

- Estudar o emprego desta metodologia para refinamento dos parâmetros de montagem em blocos fotogramétricos com diferentes configurações geométricas de voo, por exemplo, sobreposições longitudinal/lateral e uso de faixas cruzadas;
- Analisar o emprego desta metodologia para integração de dados fotogramétricos com outras fontes de MDT como referência, por exemplo, oriundos de interferometria SAR;
- Investigar a viabilidade do emprego desta metodologia para refinamento dos parâmetros de montagem dos sistemas sensores (câmera e LIDAR) instalados em (SARP).

REFERÊNCIAS

- ABDULAH, A. Mapping Matters. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 2016.
- ABDULLAH, Q. A.; TUTTLE, M. A. **Integrated GPS-Inertial Measurement Solution as an Alternative to Aerial Triangulation: A Case Study**. Proc. of the ASPRS Annual Conference. 1999. p. 53-57.
- AKCA, D. Matching of 3D surfaces and their intensities. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 62, n. 2, 2007. 112-121.
- ALAMÚS, R.; WOLFGANG, K. DMC geometry analysis and virtual image characterisation. **The Photogrammetric Record**, 23, 2008. 353-371.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2^a. ed. Curitiba: SBEE, 2003.
- ARMENAKIS, C.; GAO, Y.; SOHN, G. Co-registration of aerial photogrammetric and LiDAR point clouds in urban environments using automatic plane correspondence. **Applied Geomatics**, 5, n. 2, 2013. 155-166.
- BABAPOUR, H.; MOKHTARZADE, M.; ZOEJ, M. J. V. Self-calibration of digital aerial camera using combined orthogonal models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 117, 2016. 29-39.
- BÄUMKER, M.; HEIMES, F. J. **New calibration and computing method for direct georeferencing of image and scanner data using the position and angular data of an hybrid inertial navigation system**. OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation. 2001. p. 1-17.
- BROWN, D. C. Close-range camera calibration. **Photogramm. Eng. Remote Sens.**, 37, n. 8, 1971. 855-866.
- BUDGE, S. E.; BADAMIKAR, N. S.; XIE, X. Automatic registration of fused lidar/digital imagery (texel images) for three-dimensional image creation. **Optical Engineering**, v. 54, n. 3, p. 031105, 2014.

CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The development of camera calibration methods and models. **The Photogrammetric Record**, 16, n. 91, 1998. 51-66.

COLOMINA, I. GPS, INS and Aerial Triangulation: What is the Best Way for the Operational Determination of Photogrammetric Image Orientation? **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, 32, n. 3; SECT 2W5, 1999. 121-130.

COMANICIU, D.; MEER, P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, 24, n. 5, 2002. 603-619.

COSTA, F. A. L.; MITISHITA, E.; MARLO, M. The Influence of Sub-Block Position on Performing Integrated Sensor Orientation Using In Situ Camera Calibration and Lidar Control Points. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 260, 2018.

COSTA, F. A. L.; MITISHITA, E.; CENTENO, J. A study of integration of LIDAR and photogrammetric data sets by indirect georeferencing and in situ camera calibration. **International Journal of Image and Data Fusion**, 20 Feb 2017. 94-111.

CRAMER, M. **Digital camera calibration**. Frankfurt. 2009.

CRAMER, M.; STALLMANN, D. **OEEPE test on integrated sensor orientation – IFP results and experiences**. Proceedings of the OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation. Hannover. 2001.

CRAMER, M.; STALLMANN, D. **On the use of GPS/inertial exterior orientation parameters in airborne photogrammetry**. Proceedings of the OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation: Citeseer. 2001.

CRAMER, M.; STALLMANN, D.; HAALA, N. **Sensor integration and calibration of digital airborne three-line camera systems**. Proc. ISPRS Workshop Comm. II/1'. Bangkok. 1999.

CRAMER, M.; TUTTGART, S. Direct Geocoding-is Aerial Triangulation Obsolete? **Citeseer**, 1999.

DAL POZ, A. P. Photogrammetric refinement of LiDAR-derived building roof contours. **International Journal of Image and Data Fusion**, Fevereiro 2018. 01-13.

DELARA, R.; MITISHITA, E. A.; HABIB, A. **Bundle adjustment of images from non-metric CCD camera using LIDAR data as control points**. In: International Archives of XXth ISPRS Congress. 2004. p. 13-19.

DHALL, A. et al. LiDAR-Camera Calibration using 3D-3D Point correspondences. **arXiv preprint arXiv:1705.09785**, 27 May 2017.

FAIG, W.; MONIWA, H. Convergent Photos for Close Range. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 39, n. 6, 1973. 605-610.

FRIESS, P. **Toward a rigorous methodology for airborne laser mapping**. Proceedings EuroCOW. Castelldefels Spain. 2006. p. 25-27.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. Curitiba: Editora UFPr, 1994.

GEOSYSTEMS, L. **Leica ALS60 Airborne Laser Scanner Product Specifications**. 2008.

GHILANI, C. D. **Adjustment computations**: spatial data analysis. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

GNEENISS, A. S. **Integration of LIDAR and Photogrammetric Data for Enhanced Aerial Triangulation and Camera Calibration**. 2013.

GNEENISS, A. S.; MILLS, J. P.; MILLER, P. E. In-flight photogrammetric camera calibration and validation via complementary lidar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 100, 2015. 3-13.

GRUBER, M. **UltraCamX, the new digital aerial camera system by Microsoft Photogrammetry**. Proceedings of the Photogrammetric Week 2007. Stuttgart. 2007. p. 137-145.

GRUBER, M.; LADSTÄDTER, R. **Calibrating the digital large format aerial camera UltraCamX**. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2008 Proceedings. 2008.

HABIB, A. F. et al. Integration of laser and photogrammetric data for calibration purposes. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 35, 2004. 170.

HABIB, A. F. et al. Automatic surface matching for the registration of LiDAR data and MR imagery. **ETRI journal**, 28, n. 2, 2006. 162-174.

HABIB, A.; GHANMA, M.; KIM, E. M. **LIDAR data for photogrammetric georeferencing**. Proc. FIG Working Week and GSDI 8. Cairo. 2005.

HABIB, A.; GHANMA, M.; MITISHITA, E. A. Co-registration of Photogrammetric and Lidar Data: Methodology and case study. **Revista Brasileira de Cartografia**, 1, n. 56, 2004.

HABIB, A.; KERSTING, A. P.; BANG, K. **Comparative Analysis of Different Approaches for the incorporation of position and orientation information in integrated sensor orientation procedures**. Proceedings of Canadian Geomatics Conference 2010 and ISPRS Commission I Symposium. 2010.

HE, F. **Co-Registration between imagery and point cloud acquired by MLS Platform**. 2012.

HEIPKE, C.; JACOBSEN, K.; WEGMANN, H. **Analysis of the results of the OEEPE test "Integrated Sensor Orientation"**. Hannover, p. 31-49. 2002.

HONKAVAARA, E. et al. Geometric test field calibration of digital photogrammetric sensors. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 60, n. 6, 2006. 387-399.

HUG, C.; KRZYTEK, P.; FUCHS, W. **Advanced lidar data processing with LasTools**. XXth ISPRS Congress. 2004. p. 12-23.

ISENBURG, M. LAsTools-efficient tools for LiDAR processing. **Available at: <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/> [Accessado 26 de Março de 2016]**, 2016.

JACOBSEN, K. Potential and limitation of direct sensor orientation. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, 33, n. B3/1; PART 3, 2000. 429-435.

JACOBSEN, K. **Geometric handling of large size digital airborne frame camera images**. In: Proc. International Conference on Optical 3D Measurement Techniques VIII. Zürich. 2007. p. 164-171.

JACOBSEN, K.; WEGMANN, H. **Dependencies and problems of Direct Sensor Orientation. "Integrated Sensor Orientation, Test Report and Workshop Proceedings"**. p. 73-84. 2002.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Journal of basic Engineering**, 82, n. 1, 1960. 35-45.

KERSTING, A. P. **Quality assurance of multi-sensor systems**. University of Calgary. Calgary. 2011.

KIM, ; GHANMA, M.; HABIB, A. Integration of Photogrammetric and LIDAR data for realistic 3D model generation. **Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada**, 2006.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans**. 2^a. ed. Berlin: Walter de Gruyter, v. I, 2007.

KRUCK, E. **Combined IMU and sensor calibration with BINGO-F**. Proceedings OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation. Hannover. 2001. p. 1-3.

KUNZ, M. **Elevation changes of mountain glaciers in the Antarctic Peninsula using ASTER-controlled archival aerial photography**. Newcastle University. 2014.

LEBERL, F.; GRUBER, M.; PONTICELLI, M. **Flying the new large format digital aerial camera Ultracam**. Photogrammetric Week. 2003. p. 67-76.

LIU, J. et al. **A rigorous approach for IMU boresight misalignment calibration**. Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM), International Workshop on. 2011. p. 1-4.

LUHMANN, T. et al. **Close range photogrammetry: principles, techniques and applications**: Whittles, 2006.

MACHADO, A. M. L. **Extração Automática de Contornos de Edificações Utilizando Imagem Gerada por Câmara Digital Pequeno Formato e Dados LIDAR**. Curitiba. 2006.

MISHRA, R. K.; ZHANG, Y. A review of optical imagery and airborne lidar data registration methods. **The Open Remote Sensing Journal**, 5, n. 1, 2012. 54-63.

MITISHITA, E. A. et al. Photogrammetric and lidar data integration using the centroid of a rectangular roof as a control point. **The Photogrammetric Record**, 23, n. 121, 2008. 19-35.

MITISHITA, E. A. et al. **Calibration of Low Cost Digital Camera Using Data from Simultaneous LIDAR and Photogrammetric Surveys**. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012. p. 133–138.

MITISHITA, E. A.; CENTENO, J. A. S. **Uso de Nuvem de Pontos LIDAR como Subsídio à Estimativa de Potencial Fotovoltáico**. Annals of XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR. João Pessoa-PB. 2015. p. 5796-5801.

MITISHITA, E. et al. **Approach for Improving the Integrated Sensor Orientation**. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague. 2016. p. 33-39.

MITISHITA, E.; COSTA, F.; MARLO, M. **Study of the Integration of Lidar and Photogrammetric Datasets by In Situ Camera Calibration and Integrated Sensor Orientation**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. Hannover. 2017.

MOSTAFA, M. M. R. **Boresight calibration of integrated inertial/camera systems**. Proc. International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation-KIS. 2001. p. 440-445.

MOSTAFA, M. R. **Camera/IMU boresight calibration: New advances and performance analysis**. Proceedings ASPRS Annual Meeting. Washington, DC. 2002. p. 21-26.

PARMEHR, E. G. et al. Automatic registration of optical imagery with 3D LiDAR data using statistical similarity. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 88, 2014. 28-40.

PINTO, L.; FORLANI, G. A single step calibration procedure for IMU/GPS in aerial photogrammetry. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 34, n. B3, p. 210-213, 2002.

RONGFU, T. **Mathematical Methods for Camera Self-Calibration in Photogrammetry and Computer Vision**. University of Stuttgart. 2013.

RÖNNHOLM, P. **Registration Quality-Towards Integration of Laser Scanning and Photogrammetry**. Amsterdam. 2011.

SCOTT, T. et al. **Choosing a time and place for calibration of lidar-camera systems**. In Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference on. Stockholm: IEEE. 2016. p. 4349-4356.

SHAN, J.; CHARLES K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**: CRC press, 2018.

SHORTER, N.; KASPARIS, T. **Autonomous registration of LiDAR data to single aerial image**. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS. Boston. 2008. p. 216-219.

SIYING, C. et al. Boresight calibration of airborne LiDAR system without ground control points. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 9, 2012. 85-89.

SKALLOUD, J.; CRAMER, M.; SCHWARZ, K. Exterior orientation by direct measurement of camera position and attitude. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, 31, n. B3, 1996. 125-130.

SKALLOUD, J.; SCHAER, P. **Towards a more rigorous boresight calibration**. ISPRS International Workshop on Theory Technology and Realities of Inertial/GPS/Sensor Orientation. Castelldefels. 2003.

SKALLOUD, J.; SCHWARZ, K. P. Accurate orientation for airborne mapping systems. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 66, n. 4, 2000. 393-401.

SMITH, M. J. et al. **IMU and digital aerial camera misalignment calibration**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Anais. 2006.

SUN, Q. et al. Camera self-calibration with lens distortion. **Optik-International Journal for Light and Electron Optics**, 127, n. 10, 2016.

TAO , C. V.; HU, Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, 67, n. 12, 2001. 1347-1358.

TOTH, C. **Experiences with frame CCD arrays and direct georeferencing.** Photogrammetric Week. 1999. p. 95-108.

VOSSelman, G.; MAAS, H.-G. **Airborne and terrestrial laser scanning:** Whittles Publishing, 2010.

WANG, P. et al. One-step and two-step calibration of a portable panoramic image mapping system. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39, n. B1, p. 173-178, 2012.

WANG, R.; FERRIE, F. P. Automatic registration method for mobile LiDAR data. **Optical Engineering**, v. 54, n. 1, 2015.

WEGMANN, H. Image orientation by combined (A) AT with GPS and IMU. **INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES**, v. 34, n. 1, p. 278-283, 2002.

WILDAN, F.; ALDINO, R.; AJI, P. P. **Application of LIDAR Technology for GCP Determination in Papua Topographic Mapping Scale 1: 50.000.** In: 10th Annual Asian Conference & Exhibition on Geospatial Information, Technology & Applications. Jakarta. 2011. p. 13.

YANG, Z. H. et al. Co-Registration Airborne Lidar Point Cloud Data and Synchronous Digital Image Registration Based On Combined Adjustment. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B1, p. 259-264, 2016.

YASTIKLI, N.; TOTH, C.; GREJNER-BRZEZINSKA, D. A. **In-situ camera and boresight calibration with LiDAR Data.** Proc. The Fifth International Symposium on Mobile Mapping Technology, MMT: Citeseer. 2007.

ZHANG, W. et al. Registration of optical imagery and LiDAR data using an inherent geometrical constraint. **Optics express**, v. 23, n. 6, p. 7694-7702, 2015.